

# MATEMATICKO-FYZIKÁLNÍ FAKULTA Univerzita Karlova

## BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

Andrej Liška

## Přehled základných kosmologických objevů z let 1910-1930

Astronomický ústav UK

Vedoucí bakalářské práce: doc. RNDr. Attila Mészáros, DrSc.

Studijní program: Fyzika

Studijní obor: Obecná fyzika

Praha 2017

Prohlašuji, že jsem tuto bakalářskou práci vypracoval samostatně a výhradně s použitím citovaných pramenů, literatury a dalších odborných zdrojů.

Beru na vědomí, že se na moji práci vztahují práva a povinnosti vyplývající ze zákona č. 121/2000 Sb., autorského zákona v platném znění, zejména skutečnost, že Univerzita Karlova má právo na uzavření licenční smlouvy o užití této práce jako školního díla podle §60 odst. 1 autorského zákona.

V Praze dne 18.05.2017

Podpis autora

Název práce: Přehled základních kosmologických objevů z let 1910-1930

Autor: Andrej Liška

Ústav: Astronomický ústav UK

Vedoucí bakalářské práce: doc. RNDr. Attila Mészáros, DrSc., Astronomický ústav UK

Abstrakt: Mezi lety 1910-1930 se uskutečnilo velké množství astronomických objevů. Henrietta Swan Leavittová objevila relaci mezi svítivostí a periodou u Cepheid, které se díky tomu stali indikátory vzdáleností ve vesmíru. Na základě tohoto vztahu v roce 1925 Edwin Powell Hubble vypočítal vzdálenost k naší sousední Galaxii M31. Neúnavné zkoumání mlhovin Vesta Melvina Sliphera přineslo velmi důležitý poměr mezi červenými a modrými posunmy elektromagnetického spektra, kde jednoznačně dominují ty červené. V roce 1927 Georges Edouard Lemaître odvodil nezávisle na Alexandrovi Friedmannovi Hubbleův zákon z Einsteinových polních rovnic gravitace. O dva roky později, Hubble definitivně vyjádřil lineární chování mezi červeným posunem a vzdáleností.

Klíčová slova: Hubble-ův vztah, Slipher, rudý a modrý posuv, vizuální magnitúda, M31, Cepheidy, Lemaître, Lundmark, Strömberg, Shapley–Curtisova debata

Title: Survey of the basic cosmological discoveries from the years 1910-1930

Author: Andrej Liška

Institute: Astronomický ústav UK

Supervisor: doc. RNDr. Attila Mészáros, DrSc., Astronomický ústav UK

Abstract: Between 1910 and 1930 a large number of astronomical discoveries took place. Henrietta Swan Leavitt revealed the relationship between the luminosity and the period of Cepheids, which then became the indicators for distance determination in the universe. Based on this relation in 1925 Edwin Powell Hubble calculated the distance to our neighboring Galaxy M31. Tireless exploration of the nebulae by Vesto Melvin Slipher brought a very important ratio between the red and blue shifts, where the red ones clearly dominated. In 1927 Georges Edouard Lemaître derived Hubble's law from Einstein's field equations, independently on Alexander Alexandrovich Friedmann. Two years later Hubble definitely demonstrated the linear behavior between the red shift and the distance.

Keywords: Hubbles relation, Slipher, redshift and blueshift, visual magnitudes, M31, Cepheids, Lemaitre, Lundmark, Strömberg, The Shapley–Curtis debate

Veľká vďaka patrí predovšetkým pánu doc. RNDr. Attilovi Mészárosovi, DrSc., za potrebné materiály, cenné rady a pripomienky týkajúce sa danej problematiky. Týmto spôsobom, by som rád prejavil vďaku aj mojim spolubývajúcim Marcelovi Štolcovi, Martinovi Šípkovi a Petrovi Hojnošovi, ktorí mi pomohli vytvoriť tú správnu pracovnú atmosféru na písanie mojej bakalárskej práce. Nemalá vďaka patrí ja mojej rodine, ktorá ma pri písaní neustále podporovala a dodávala mi potrebné množstvo inšpirácie a síl.

Všetkým patří vřelá vďaka.

# Obsah

Úvod	2
<b>1 Vzdialenosti vo vesmíre</b>	<b>4</b>
1.1 Počiatok datovania premenných hviezd . . . . .	4
1.2 Charakteristika premenných hviezd . . . . .	5
1.2.1 Vnútorne premenné hviezdy . . . . .	5
1.2.2 Vonkajšie premenné hviezdy . . . . .	5
1.3 Premenné hviezdy Cepheidy . . . . .	5
1.4 Kappa-mechанизmus . . . . .	6
1.5 Cepheidy ako nástroj k určovaniu vesmírnych vzdialeností . . . . .	7
1.6 Henrietta Swan Leavittová a jej vzťah medzi periódou a svietivosťou . . . . .	8
1.7 Objav Cepheid vo Veľkej hmlovine v Andromede . . . . .	10
1.8 Pokusy o stanovenie vzdialenosti M31 . . . . .	13
1.9 Špirálová hmlovina ako hviezdny systém a jej vzdialenosť . . . . .	14
1.10 Zhrnutie . . . . .	15
<b>2 Rozpínanie vesmíru</b>	<b>16</b>
2.1 Dopplerov jav, červený a modrý posun . . . . .	16
2.2 Určovanie rýchlosti vzdalovania objektu pomocou merania červeného posunu . . . . .	16
2.3 Radiálne rýchlosti vesmírnych objektov ako vodítko na určenie ich vzdialenosti . . . . .	17
2.4 Shapley-Curtisova debata . . . . .	18
2.5 Ludwik Silberstein a jeho závislosť medzi červeným posunom a vzdialenosťou (1924) . . . . .	19
2.6 Knut Emil Lundmark a jeho závislosť radiálnej rýchlosti na vzdialenosti (1924) . . . . .	20
2.7 Gustaf Strömberg a vzťah radiálnej rýchlosti na vzdialenosti (1925) . . . . .	21
2.8 Georges Edouard Lemaître ako otec "Hubbleovej konštanty" (1927) . . . . .	21
2.9 Edwin Powell Hubble a expandujúci vesmír (1929) . . . . .	22
2.10 Zhrnutie . . . . .	24
<b>Záver</b>	<b>25</b>
<b>Zoznam použitej literatúry</b>	<b>26</b>
<b>Zoznam obrázkov</b>	<b>32</b>
<b>Zoznam tabuliek</b>	<b>33</b>

# Úvod

Na začiatku dvadsiateho storočia vrcholili debaty ohľadom vesmíru ako takého, ktoré v širokej miere zasahovali nielen kruhy popredných astronómov, ale aj široké spektrum verejnosti.

Najrozporupnejšia otázka sa týkala veľkosti vesmíru a vzdialenosti pozorovaných objektov. Všetky tieto diskusie vyvrcholili tzv. Veľkou debatou medzi uznávanými osobnosťami, kde na jednej strane stál Harlow Shapley a na strane druhej Hebert Curtis. Odlišné názory dvoch uznávaných osobností boli v značnej miere rozosiata aj medzi bežných ľudí, ktorí sa svojvoľne pridružili, či už k jednému táboru, alebo k tomu druhému. Táto Harlow-Curtisova diskusia našla svoje rozuzlenie až po Hubbleových objavoch, no historické analýzy naznačujú, že mohla byť vyriešená už skôr.

V druhej dekáde dvadsiateho storočia vyšiel popredný článok Henrietti Swan Leavittovej, ktorá svoje dlhoročné štúdie premenných hviezd pretavila do objavu tak dôležitého vzťahu medzi periódou a svietivosťou, ktorý vykazujú premenné hviezdy Cepheidy. Tento objav sa stal novou etapou v skúmaní vesmíru, nakoľko do tej doby neexistovali jednotné objekty, ktoré by slúžili ako indikátory vzdialenosti. V tom čase bola známa metóda určovania vzdialenosti pomocou nov, tá však mnohými astronómami nebola uznaná. Po tomto prevratnom objave sa otvorili nové možnosti poznávania vesmírneho rozloženia celých nebeských sústav. Postupom času sa začali Cepheidy detegovať aj v iných hviezdnych sústavách, čo umožnilo určiť ich vzdialenosť.

Druhým nemenej podstatným objavom bola korelácia medzi radiálnou rýchlosťou a vzdialenosťou. Ukázalo sa, že čím sú objekty vzdialenejšie, tým rýchlejšie sa od nás vzdalujú. Taktiež po objave nových galaxií sa potvrdilo, že červené posuvy sú v značnej prevahe nad tými modrými. Tento tzv. Hubbleov vzťah ostal až do dnešnej doby pripisovaný Edwinovi Powellovi Hubbleovi, no historické pramene zahrňujú aj iné mená, ktoré majú, čo dočinenia s touto koreláciou.

Už pred rokom 1929, kedy Hubble vydal svoj článok ohľadom rozpínania vesmíru sa objavujú podobné spisy, ktoré sa len v malej miere odlišujú od toho Hubbleovho. Minimálne Georges Edouard Lemaître v roku 1927 odvodil relativisticky nestacionárne modely vesmíru a dal ich do priamej súvislosti s jeho expanziou, čo prinieslo aj určitú hodnotu Hubbleovej konštanty. Je pravdou, že vo svojich článkoch sa odvoláva aj na práce jeho predchodcov napr. Gustafa Strömberga, ktorý ešte dva roky pred Lemaîtrerom pozoroval koreláciu medzi radiálnymi rýchlosťami a vzdialenosťami.

Prvá myšlienka, avšak nie úplne korektná, pochádzala od Ludwika Silbersteina, ktorý spomínaný vzťah napasoval na rozličné typy objektov. Podstatou je, že táto myšlienka z roku 1924 zapálila a podnietila mnohých astronomických géniov, ktorý svojimi objavmi zmapovali vesmír až do takej podoby, aký ho poznáme dnes.

Náplňou tejto práce bude podať učený prehľad tých najvýznamnejších kozmologických pozorovaných objavov, ktoré sa uskutočnili v priebehu druhej a tretej dekády dvadsiateho storočia. Dôraz sa bude klásť prevažne na vzdialenosť k Veľkej galaxii v Andromede, a tým aj na prostriedky jej vtedajšieho určenia t.j. na premenné hviezdy Cepheidy. Druhá časť práce bude zahrňovať postupný historický prehľad objavu korelácie medzi radiálnymi rýchlosťami a vzdialenosťami, ktorá bude zameraná, len na pozorovateľné objavy, teda bez uvažovania teoretických pokrokov v danom období. Naše snaženie sa bude sústrediť prevažne na galaktické vzdialenosti, preto uvažovanými objektami budú vo veľkej miere samotné galaxie, ktorých pohyb v priestore bol v prvej polovici dvadsiateho storočia diskutovaný.

# 1. Vzdialenosti vo vesmíre

## 1.1 Počiatok datovania premenných hviezd

Najstarší historicky datovaný dokument, ktorý sa zmieňuje a čiastočne rozoberá premenné hviezdy je približne 3 200 rokov starý pergamen, pochádzajúci od Egypťanov. Tento zvitok zaznamenáva informácie o zákrytovej dvojhviezde Algol, ktorá sa nachádza v súhvezdí Perzeus (Jetsu a Porceddu, 2015).

Avšak prvou skutočnou pozorovanou premennou hviezdou novodobejšej astronómie je hviezda Omicron Ceti známa tiež pod názvom Mira<sup>1</sup>. V počiatkoch jej skúmania bola opísaná ako nova astronómom Davidom Fabriciom z 3. augusta roku 1596, ktorý sa primárne venoval pohybu Merkúra. Avšak pri skúmaní jeho trajektórie potreboval referenčnú hviezdu, ktorou sa stala práve Mira<sup>2</sup> (v tých časoch ešte neznáma a nepreskúmaná) zo súhvezdia Veľryba. Nenápadná hviezda, ktorá však 21. augusta roku 1596 prudko zmenila svoju jasnosť o takmer celú jednu magnitúdu a následne v októbri toho istého roku sa stratila z dohľadu. Tento jav, ktorý vo svojom spise diskutuje Fabricius bol v danom období známy maximálne pre novy, a tým pádom bola Mira reprodukovaná z počiatku mylne ako nova a nie ako premenná hviezda. Tento verdikt sa považoval za uzavretý a viac sa o Mire nediskutovalo, až kým ju s veľkým prekvapením opäť detegoval David Fabricius 16. februára 1609, čo bolo v rozpore s dovtedajšou mienkou ohľadom chápania Miry ako novy (Hoffleit, 1996).

V roku 1638 Johannes Holward určil periódu jej pulzov na 11 mesiacov, a preto je objav premennej hviezdy Mira pripisovaný práve tomuto astronómovi (Hoffleit, 1996). Pri postupe o niekoľko storočí dopredu sa objavuje prvá zmienka ohľadom premenných hviezd, ktoré nesú spoločný názov Cepheidy. Prvým predstaviteľom tohto typu premenných hviezd bola hviezda Eta Aquilae zo súhvezdia Orol, ktorej periodické zmeny svietivosti objavil 10. septembra 1784 Edward Pigott. Vo svojom liste z 5. decembra roku 1784 adresovanom H.C. Englefieldovy sa zmieňuje "10. septembra 1784 som prvý krát vnímal zmenu jasu hviezdy Eta Antinoi"<sup>3</sup> (Pigott, 1785).

Tento výrok je považovaný za prvú zmienku v oblasti premenných hviezd Cepheid. Paradoxom je, že familiárny názov Cepheidy si daný typ premenných hviezd zaslúžil po hviezde Delta Cephei zo súhvezdia Cepheus, ktorej periodické zmeny objavil o niekoľko mesiacov neskôr John Goodrick (Hoffleit, 1996).

---

<sup>1</sup>Mira je najjasnejšia dvojhviezda v súhvezdí Veľryba, ktorej zložky sú tvorené červeným obrom Mira A a bielym trpaslíkom Mira B. Táto dvojhviezda, presnejšie jej červená časť Mira A sa stala prototypom premenných hviezd s dlhou periódou, ktoré nesú jej meno t.j. Miridy.

<sup>2</sup>Mira bola zvolená za referenčnú hviezdu pre pozorovanie Merkúra, len vďaka jej vtedajšej polohe v blízkosti skúmanej planéty. Je vysoko pravdepodobné, že ak by David Fabricius v danom období neskúmal charakteristiky Merkúra, Mira by sa nikdy nestala prvou pozorovanou premennou hviezdou.

<sup>3</sup>Eta Aquilae a Eta Antinoi sú len dva odlišné názvy pre jednu a tú istú hviezdu. Edward Pigott vo svojom článku používal starší názov Eta Antinoi na rozdiel od dnešného pomenovania Eta Aquilae.



## 1.2 Charakteristika premenných hviezd

Mohutná oblasť astronómie je zameraná prevažne na hviezdy a procesy spojené s hviezdami. Bežný laik pri pohľade na jasnú nočnú oblohu vidí rádovo len niekoľko tisíc hviezd. To je však nepatrný zlomok z celkového počtu hviezd, ktoré vo vesmíre žijú. Doterajšie poznatky ohľadom množstva hviezd sú na rozmedzí nepredstaviteľných číselných škál. Pritom sa nediskutuje len o jednotvárných objektoch, ale o celej rodine pestrých a rozmanitých druhov, čo do tvaru, veľkosti, hmotnosti, veku, vývoja, vnútornej stavby a mnohých ďalších aspektov. Z celej tejto hviezdnej rodiny nás bude zaujímať predovšetkým jedna veľká samostatná trieda, a to premenné hviezdy. Aby sme sa postupne dopracovali až k veľmi špeciálnemu typu premenných hviezd, konkrétne k Cepheidám, musíme sa najskôr pozrieť na ich populáciu.

### 1.2.1 Vnútorne premenné hviezdy

Variabilita vnútorných premenných hviezd je zapríčinená fyzikálnymi vlastnosťami samotnej hviezdy. Na základe tejto charakteristiky ich je možné rozčleniť do troch hlavných skupín:

- a) **Eruptívne premenné hviezdy:** Rozsiahle erupcie na ich povrchu spôsobujú variabilitu ich jasnosti.
- b) **Pulzujúce premenné hviezdy:** Zmena jasnosti je spôsobená kolísaním ich polomeru, ktorý sa adaptuje na patričné fyzikálne zmeny počas svojho života.
- c) **Kataklizmatické premenné hviezdy:** Zmena jasnosti je spôsobená nevratným fyzikálnym procesom.

### 1.2.2 Vonkajšie premenné hviezdy

Premenlivosť je spôsobená extenzívnymi faktormi v blízkosti hviezdy. Vonkajšie premenné hviezdy je možné rozčleniť na dve veľké skupiny a to:

- a) **Rotujúce premenné hviezdy:** Tento typ premenných hviezd sa vyznačuje buď zvýšenou rotáciou, ktorá spôsobuje elipsoidálny tvar, alebo značne defekty, ako napríklad škvrny, ktoré spôsobia kolísanie jasnosti daného typu.
- b) **Zákrytové dvojhviezdy:** Podstatou zmeny jasnosti daného systému je rotácia oboch komponent okolo spoločného ťažiska, pričom rovina rotácie je zároveň rovinou pozorovateľa. V určitom momente, môže byť jasnejšia komponenta zatienená tou tmavšou a naopak, čo spôsobí varírovanie jasnosti celého systému, pričom ani jedna z komponent nemusi byť premenná hviezda.

## 1.3 Premenné hviezdy Cepheidy

Z vyššie uvedeného je možné konštatovať, že Cepheidy sú vnútorné pulzujúce premenné hviezdy. Tento typ premenných hviezd sa navzájom od seba líši mnohými faktormi ako je priemer, teplota, vek, evolučná história, hmotnosť, ale hlavným aspektom, ktorý pre ďalší postup bude najmarkantnejším je zmena ich jasnosti v dobre definovanom časovom intervale. Tento veľmi silný vzťah medzi jasnosťou a periódou sa stal podstatným ukazovateľom kozmických vzdialeností (Freedman a kol., 2001), (Tammann a kol., 2008).

Je však nutné poznamenať, že spomenutá závislosť je korektným ukazovateľom len tých kozmických vzdialeností, ktoré sú relatívne malé<sup>4</sup>, teda popisuje len blízke objekty, na ktoré je možné správne napasovať reláciu medzi periódou a jasnosťou Cepheidy. Vzdialenostná škála, na ktorej je ešte dobre použiteľná metóda Cepheid sa pohybuje až na úroveň 13 miliónov svetelných rokov.

Táto čelaď hviezd sa rozdeľuje na dve veľké skupiny, a to klasické Cepheidy a Cepheidy typu II. Medzi klasické Cepheidy patria hviezdy, ktorých charakteristická hmotnosť sa pohybuje na úrovni 4-20 násobku slnečnej hmotnosti (Turner, 1996) a jasnosť dosahujú až 100 000 násobku tej slnečnej (Turner, 2010). Tento typ Cepheid je reprezentovaný predovšetkým žltými obrami a nadobrami spektrálneho typu F6-K2. Pri pulzovaní je pozorovateľná zmena ich polomeru až o niekoľko milión kilometrov (Rodgers, 1957). Naopak Cepheidy typu II sú staré hviezdy s malou hmotnosťou (cca polovica hmotnosti Slnka) a ich vnútorná štruktúra vykazuje len veľmi malú prítomnosť kovových prvkov. Perióda ich zjasnenia sa pohybuje v rozmedzí 1-50 dní (Wallerstein, 2002), (Soszyński, 2008).

## 1.4 Kappa-mechanizmus

Aby bolo možné bližšie pochopiť zmeny odohrávajúce sa na Cepheidách je nutné sa bližšie pozrieť na tzv. Kappa-mechanizmus. Podstatou Kappa-mechanizmu je ionizácia a následná rekombinácia, či už atómov, alebo iónov nejakého plynu, špeciálne pri Cepheidách ide o nedokonale ionizované hélium, ktoré vznikne pri strate jedného elektrónu zo svojho atómového obalu.

Pri stláčaní vrstvy nedokonale ionizovaného hélia do nižších vrstiev atmosféry hviezdy, môže dôjsť k úplnej ionizácii atómu hélia na jeho ión, čo je doprevádzané stratou priehľadnosti (opacity). Táto nepriehľadná vrstva vytvorí hranicu, ktorá zamedzuje prenikaniu žiarenia z jadra hviezdy do jej vonkajších častí, čo spôsobí stratu gravitačnej rovnováhy medzi jadrom hviezdy a jej vonkajšími obálkami.

Nakoľko daná hviezda je stále aktívna a v jej jadre neprestali prebiehať termonukleárne reakcie, sa vplyvom gravitácie začnú jej vonkajšie vrstvy zmršťovať a padať smerom do vnútra hviezdy. Jadrom produkujúce žiarenie sa však nestráca, putuje hviezdou smerom na povrch, ale pri dosiahnutí nepriehľadnej vrstvy nedokonale ionizujúceho plynu hélia sa zastaví. Vzhľadom k tomu, že celé žiarenie sa postupne kumuluje v nepriehľadnej vrstve, ktorá mu neumožňuje postupovať smerom k povrchu, spôsobí že nepriehľadná vrstva sa pomaličky začne zahrievať a tým pádom dochádza k jej rozpínaniu. Pri procese rozpínania dochádza k opätovnému spriehľadneniu dovtedy nepriehľadnej vrstvy. Jej následné spriehľadnenie umožní žiareniu preniknúť do už kolabujúcich vonkajších obálok hviezdy, ktoré sa vplyvom žiarenia postupne zahrejú a začnú sa opäť rozpínať. Po uvoľnení

---

<sup>4</sup>Slovo "relatívne malé" nesie v sebe mnohé úskalia. Pri uvažovaní pozemských vzdialeností, je to nepredstaviteľne väčšia škála, ale pri úvahe kozmického priestoru nám Cepheidy poskytujú spoľahlivú oblasť korektných vzdialeností, len do určitého hraničného úseku, za ktorým je ich charakteristická vlastnosť pre naše účely celkom irelevantná.

žiarenia sa hviezda opäť zmrští do fáze, v ktorej dominuje gravitačná rovnováha medzi jadrom a jednotlivými vrstvami (Maeder, 2009).

Obrovským míľnikom pre celú astronómickú komunitu bolo zistenie, že tento proces sa nedeje v náhodných časových intervaloch, ale s takmer dokonalou presnosťou rovnakých časových intervalov, pričom ostáva konštantná svetelná krivka počas celého procesu.

## 1.5 Cepheidy ako nástroj k určovaniu vesmírnych vzdialeností

Aby bolo možné nejakým spôsobom určiť vzdialenosť k pulzujúcej Cepheide je nutné prijať a dokázať existenciu významného vzťahu medzi periódou pulzovania a svietivosťou. Z grafického vynesenia závislosti medzi periódou a svietivosťou je zrejmé, že čím väčšia je perióda pulzov, tým jasnejšia je daná hviezda vo svojom maxime. Na základe pozorovaní Henrietti Swan Leavittovej sa v roku 1908 objavila už spomínaná závislosť medzi periódou a svietivosťou, ktorú o 4 roky neskôr zverejnila (Leavitt, 1912c).

Avšak aj po znalosti korelácie svietivosť-perióda nie je vôbec jednoduché ju okalibrovať tak, aby sme dostali relevantné výsledky. Najväčší problém spočíva v tom, že keď už aj bola detegovaná nejaká Cepheida a podarilo sa z vysokou presnosťou určiť jej svetelnú krivku, stále tu ostáva najdôležitejší krok a to stanoviť jej vzdialenosť pomocou diametrálne odlišnej metódy.

Ako prednostný kalibrátor tohto vzťahu bola zvolená hviezda Delta Cephei zo súhvezdia Cepheus, ktorej vzdialenosť sa podarilo určiť nezávisle na vzťahu medzi periódou a svietivosťou, pomocou znalosti jej paralaxy (de Zeeuw a kol., 1999), (Benedict a kol., 2002). Až po takto determinovaných vzdialenostiach je možné pokúsiť sa určiť kalibračné konštanty vo vzťahu medzi periódou a svietivosťou. Do úvahy je pritom nutné zobrať nesmierne množstvo aspektov, ktorými sú dané výpočty zaťažené. Už len vyššie rozoberaný Kappa-mechanizmus podmieňuje fakt, že každý typ premenných hviezd bude splňovať o niečo odlišnejšie hodnoty kalibračných konštánt relácie perióda-svietivosť.

V priebehu prvej polovice dvadsiateho storočia sa mnoho astronómov snažilo danú koreláciu správne okalibrovať, ale každý dospel k trošku odlišnejším hodnotám. Výrazne sa o to pričínal Harlow Shapley, ktorý v tých časoch zozbieral paralaxy mnohých hviezd (Goldberg, 1973). Jeden s prvých aktérov, ktorý sa pokúsil rozlúsknuť otázku správnej kalibrácie vzťahu perióda-svietivosť bol Hertzsprung (Hertzsprung, 1913). V dnešnej dobe sa používa kalibrácia z roku 2008, kedy sa podarilo astronómom určiť vzdialenosť ku Cepheide RS Puppis s presnosťou 1 percento (Bond a Sparks, 2009), (Kervella, 2008). Nižšie uvedené vzťahy sú jedny z najpresnejších kalibrácií relácie perióda-svietivosť, ktoré sú určené na základe trigonometrických paralaxy desiatich blízkych Cepheid, ktorých dáta boli zozbierané Hubbleovým vesmírnym ďalekohľadom.

$$M_V = (-2,43 \pm 0,12)(\log_{10}(P) - 1) - (4,05 \pm 0,02), \quad (1.1)$$

kde  $M_V$  je absolútna magnitúda a  $P$  je perióda v dňoch. Zo znalosti takto spočítanej absolútnej magnitúdy (1.1) môžeme písať finálny vzťah pre výpočet vzdialenosti Cepheid (Benedict a kol., 2007), (Benedict a kol., 2002).

$$5\log_{10}(d) = V + 3,34\log_{10}(P) - 2,45(V - I) + 7,52, \quad (1.2)$$

$$5\log_{10}(d) = V + 3,37\log_{10}(P) - 2,55(V - I) + 7,48, \quad (1.3)$$

kde  $d$  je vzdialenosť,  $P$  je opäť perióda  $V$  je index pre blízku infračervenú oblasť a  $I$  je vizuálna zdanlivá magnitúda (Majaess a kol., 2011), (Benedict a kol., 2002).

## 1.6 Henrietta Swan Leavittová a jej vzťah medzi periódou a svietivosťou

3. marca 1912 publikoval Edward C. Pickering dovedy nahromadené informácie o pozorovaniach Henrietti Swan Leavittovej. Tá v roku 1908 objavila vzťah medzi absolútnou magnitúdou a periódou svetelných zmien na premenných hviezdach typu Cephei. Aj na vzdory veľkému množstvu problémov, ktoré svoja doba prinášala sa pani Leavittovej podarilo zozbierať pomocou 24. palcového ďalekohľadu Bruce informácie o stovkách premenných hviezd nachádzajúcich sa v Magellanových mračnách (Leavitt, 1912b).

V už spomínanej publikácii Pickeringa je obsiahnutých 25 premenných hviezd situovaných v okolí guľovej hviezdokopy v Malom Magellanovom mračne. Štúdiá jej pozorovaní sú zachytené v tabuľke 1.1, ktorá zaznamenáva parametre zľava: maximálnu svietivosť, minimálnu svietivosť, dobu vyjadrenú v dňoch, periódu v dňoch pre všetky publikované premenné hviezdy. Posledné dva stĺpce zachytávajú odklon skutočnej absolútnej magnitúdy od fitovaných priamok pre odpovedajúce maximá a minimá, ktoré sú vykreslené v grafe 1.2 (Leavitt, 1912b).

Graf 1.2 a) zaznamenáva závislosť medzi periódou a odpovedajúcou magnitúdou u všetkých pojednávajúcich premenných hviezdach. Pričom na horizontálnej osi je vynesená perióda pulzov v dňoch a na vertikálnej osi je vynesená korešpondujúca hodnota magnitúdy pre maximá a minimá. Sám autor článku sa zmieňuje, že obe krivky, či už pre maxima alebo minima sú prekvapivo hladké a pozoruhodnej formy. Naproti tomu graf 1.2 b) vykresľuje závislosť medzi logaritmom periódy a súhlasnou magnitúdou. Celkovo z grafu 1.2 je patrná jednoduchá relácia medzi jasom skúmaných premenných hviezd a ich periódami (Leavitt, 1912b).

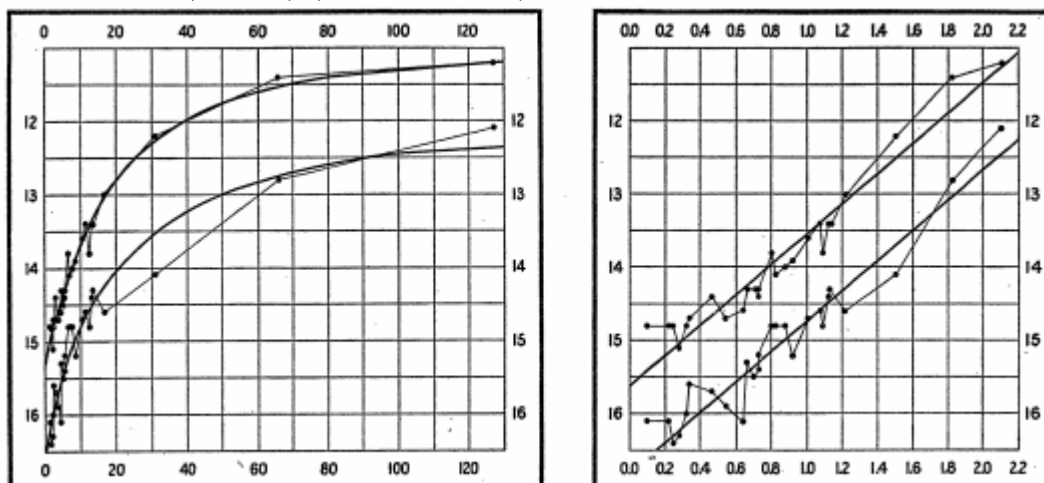
Graf 1.2 teda demonštruje pozoruhodnú vlastnosť Cepheid, a to tú, že s pribúdajúcim jasom klesá ich perióda pulzov. Čím jasnejšiu Cepheidu budeme pozorovať, tým dlhšiu bude mať periódu (Leavitt, 1912a). Táto na prvý pohľad ničím významná relácia dvoch bežných parametrov hviezdy sa stala vstupenkou do novej etapy vnímania vesmíru. Do tejto doby nebolo možné s určitosťou povedať v akom rozmedzí sa nachádzajú pozorované objekty. Jediným spoľahlivým indikátorom určovania vzdialenosti bola metóda určovania paralaxy, ale tá bola výrazne limitovaná len na krátke vzdialenosti. Paradoxom je, že aby sa metóda Cepheid

uplatnila v praxi na vesmírne vzdialenosti, bolo nevyhnutnosťou napasovať metódu paralaxy na zistenú koreláciu a tým ju korektne okalibrovať, až do takej podoby, aby poskytovala relevantné výsledky.

Obr. 1.1: Charakteristiky všetkých 25. premenných hviezd (Leavitt, 1912b)

H.	Max.	Min.	Epoch.	Period.	Res. M.	Res. m.	H.	Max.	Min.	Epoch.	Period.	Res. M.	Res. m.
			<i>d.</i>	<i>d.</i>						<i>d.</i>	<i>d.</i>		
1505	14.8	16.1	0.02	1.25336	-0.6	-0.5	1400	14.1	14.8	4.0	6.650	+0.2	-0.3
1436	14.8	16.4	0.02	1.6637	-0.3	+0.1	1355	14.0	14.8	4.8	7.483	+0.2	-0.2
1446	14.8	16.4	1.38	1.7620	-0.3	+0.1	1374	13.9	15.2	6.0	8.397	+0.2	-0.3
1506	15.1	16.3	1.08	1.87502	+0.1	+0.1	818	13.6	14.7	4.0	10.336	0.0	0.0
1413	14.7	15.6	0.35	2.17352	-0.2	-0.5	1610	13.4	14.6	11.0	11.645	0.0	0.0
1460	14.4	15.7	0.00	2.913	-0.3	-0.1	1365	13.8	14.8	9.6	12.417	+0.4	+0.2
1422	14.7	15.9	0.6	3.501	+0.2	+0.2	1351	13.4	14.4	4.0	13.08	+0.1	-0.1
842	14.6	16.1	2.61	4.2897	+0.3	+0.6	827	13.4	14.3	11.6	13.47	+0.1	-0.2
1425	14.3	15.3	2.8	4.547	0.0	-0.1	822	13.0	14.6	13.0	16.75	-0.1	+0.3
1742	14.3	15.5	0.95	4.9866	+0.1	+0.2	823	12.2	14.1	2.9	31.94	-0.3	+0.4
1646	14.4	15.4	4.30	5.311	+0.3	+0.1	824	11.4	12.8	4.	65.8	-0.4	-0.2
1649	14.3	15.2	5.05	5.323	+0.2	-0.1	821	11.2	12.1	97.	127.0	-0.1	-0.4
1492	13.8	14.8	0.6	6.2926	-0.2	-0.4							

Obr. 1.2: Závislosť medzi svietivosťou a periódou pre 25. skúmaných premenných hviezd, kde graf 1a) je v nelogaritmickej mierke (vľavo) a graf 1b) je v logaritmickej mierke (vpravo) (Leavitt, 1912b)



## 1.7 Objav Cepheid vo Veľkej hmlovine v Andromede

Veľká hmlovina v Andromede<sup>5</sup> je pomenovanie pre najnápadnejšiu špirálovú galaxiu na oblohe, ktorá je veľmi dobre pozorovateľná aj voľným okom. Vďaka svojej jasnosti a viditeľnosti sa dostala aj do katalógu Messierových objektov pod číslom M31<sup>6</sup>.

Bola pozorovaná ako hmlistý obláčik, ktorý bol okolo centra jasnejší a ktorého celková svietivosť sa pohybovala na škále medzi štyrmi, až piatimi magnitúdami. Tento objekt bol uvedený už vo hviezdnom katalógu Al-Sufi z desiateho storočia (Hubble, 1926). Ako prvý ju ďalekohľadom pozoroval v roku 1612 Marius, ktorý ju popísal ako : "like a candle seen through a horn" , čo v preklade znamená : "ako sviečka videná cez roh" (Hubble, 1926).

V roku 1885 bol záujem o hmlovinu sústredený na novu v blízkosti centra, ktorej svietivosť sa vyšplhala až na ôsmu magnitúdu. O dva roky neskôr boli vyhotovené fotografie na 20 palcovom ďalekohľade, ktoré publikoval Isaac Roberts (Hubble, 1926). Na týchto snímkach bol prvý krát zaznamenaný hlavný vzor tejto špirálovej galaxie. Následne na to bola Ranyardom reprodukováaná jedna z Robertsových fotografií v Knowledge vo februári 1889. Tento jeho článok sa stal najlepším spisom ohľadom špirálových galaxií, ktoré boli do tej doby objavené (Hubble, 1926).

Prichádzali však aj ďalšie objavy hviezd v špirálovej hmlovine, avšak ich skutočný význam bol docenený až o niekoľko rokov neskôr. V roku 1899 Scheiner fotografoval dnes už známy slnečný typ absorpčného spektra a z určitostou oznámil, že pozorovaná veľká hmlovina v Andromede musí byť obrovský systém hviezd. Heliocentrická radiálna rýchlosť bola stanovená na -300 km/s, ktorá bola nezávisle určená niekoľkými pozorovateľmi<sup>7</sup> (Hubble, 1926), (Slipher, 1915). Sklon v krivkách, ktorý sa objaví, keď je štrbina orientovaná pozdĺž hlavnej osy bola podľa hlásenia Sliphera vypočítaná Peasonom v roku 1917 (Hubble, 1926).

Podľa dosiahnutých výpočtov je lineárna rýchlosť rotácie v poriadku a je predpísaná na  $0,48x$  km/s, kde  $x$  je vzdialenosť od jadra v uhlových sekundách. Ritchey v roku 1917 objavil dve slabšie novy, ktoré boli zaznamenané na jeho skorších fotografiách M31 (Ritchey, 1917). Od tej doby bolo pozorovaných ďalších 83 nov na observatóriu Mount Wilson. V roku 1923 boli objavené dve slabé premenné hviezdy. Po ich bližších analyzovaniach sa ukázalo, že sa jedná o premenné hviezdy Cepheidy s periódou 20 a 31 dní. Od tohto veľkého objavu premenných Cepheid

---

<sup>5</sup>Galaxia v Andromede, ako jedna z najpreskúmanejších galaxií má mnoho zaužívaných názvom ako napríklad Veľká hmlovina v Andromede, Galaxia v Andromede, Veľká špirála, Messier 31, M31 a iné. V danom období ešte nebol dostatočne ozrejmý skutočný charakter tohto objektu, a preto vo väčšine článkov bol zaužívaný názov hmlovina.

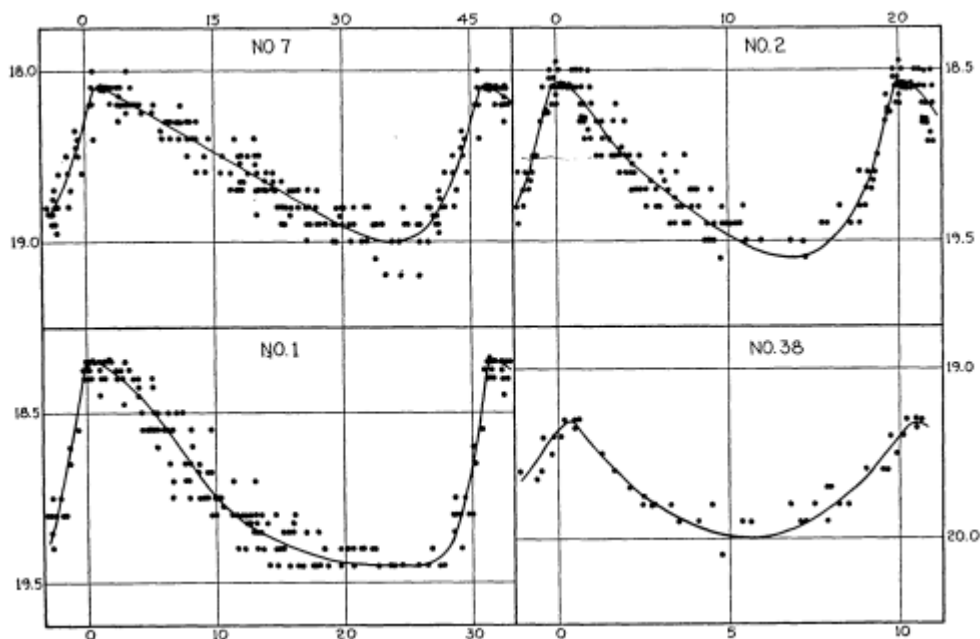
<sup>6</sup>Prívlastkom M sa označujú tzv. Messierove objekty, ktoré sa nachádzajú v katalógu "Nebulae and star clusters", zostaveného Charlesom Messierom v 1781, ktorý obsahuje 110 výrazných a jasných objektov na oblohe (Messier, 1781).

<sup>7</sup>Ak nebude inak povedané, tak v celom texte bude znamienko mínus pre rýchlosťami indikovať objekty alebo sústavy objektov, ktoré sa približujú k referenčnému pozorovateľovi. Naopak znamienko plus signalizuje vzďaľovanie sa daných objektov, alebo celých sústav.

záujem o M31 ešte viac vzrástol a galaxia bola pozorovaná vtedy najväčším ďalekohľadom svojej doby, a to 100 palcovým reflektorom na observatóriu v Mount Wilson. Následne na to bolo objavených ďalších 50 premenných hviezd, z ktorých bolo 40 Cepheid. Tieto premenné hviezdy boli objavované prevažne v určitých regiónoch, do ktorých bola M31 rozdelená.

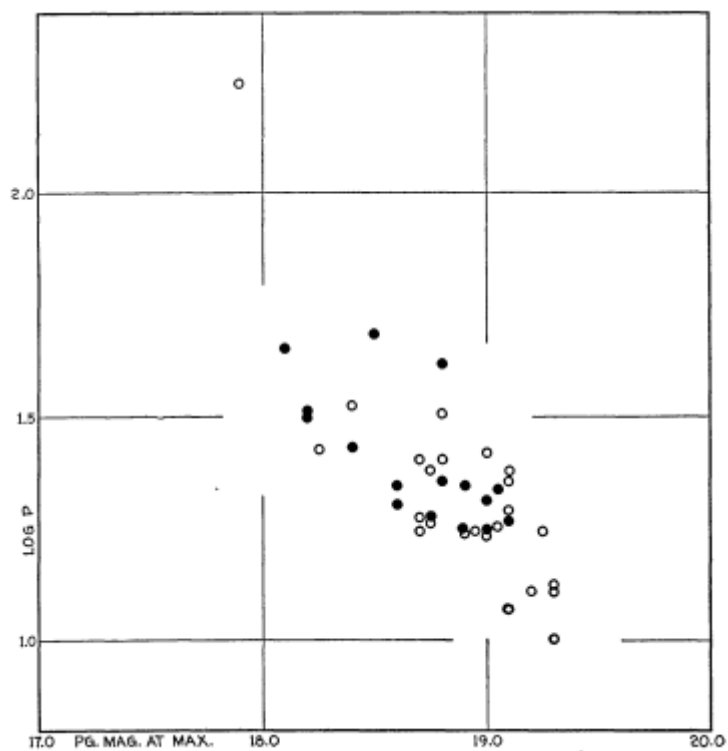
Autor vo svojom článku napísal, že Veľká galaxia v Andromede je stredný typ špirálovej galaxie; Sb v jeho klasifikácii (Hubble, 1926). V tomto spise je rozdelená do štyroch veľkých regiónov, z ktorých každý má svoje špecifické rysy. Prvý región predstavuje jadro a zvyšné tri sú situované a popísané vzhľadom k nemu. Najväčšia pozornosť bola sústredená špeciálne na tie oblasti, ktoré v sebe ukrývali premenné Cepheidy ako indikátory vzdialenosti. Rozsiahla rada pozorovaní koncentrovaná prevažne na vybrané premenné Cepheidy priniesla svoje ovocie až po určitej dobe, za ktorú sa zozbieralo dostatok kredibilných informácií umožňujúcich určiť vzdialenosť k M31. Rozsahy jednotlivých periód pri skúmaných Cepheidách sa pohyboval medzi 10. až 48. dňami a ich magnitúda v maxime dosahovala hodnoty 18,1 až 19,2. Relácia, ktorú Cepheidy vykazujú konkrétne periódami-svietivosťou pomohla stanoviť vzdialenosť galaxie M31, ktorá bola určená so značnou presnosťou v rámci vzdialenosti k Magellanovým mračnám.

Obr. 1.3: Svetelné krivky pre štyri Cepheidy v M31 (Hubble, 1929b)

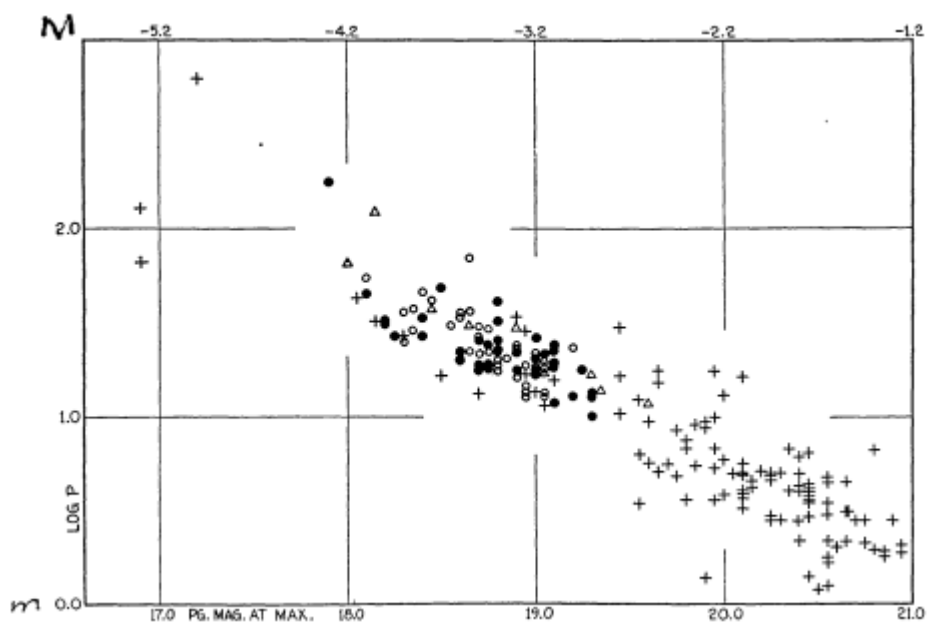


Vyššie uvedený graf 1.3 zaznamenáva charakteristiku vybraných premenných Cepheid, pričom krivky sú zosynchronizované podľa Hertzsprungovej relácie medzi tvarom a periódou (Hertzsprung, 1926). Za pozornosť stojí poznamenať, že tento graf dokonale vykresľuje už spomínaný vzťah medzi periódou a svietivosťou. Tieto vybrané štyri Cepheidy osobitým spôsobom prispeli k určeniu vzdialenosti M31. V grafe 1.4 je reprezentovaná závislosť logaritmu  $P$  (teda doby v dňoch medzi jednotlivými vrcholmi svietivosti) na maxime jasnosti pre vtedy pozorované Cepheidy v M31. Sklon je zrovnateľný s krivkou publikovanou Shapleyom pre Cepheidy nachádzajúce sa v Malom Magellanovom mračne (Shapley, 1925). Graf

Obr. 1.4: Vzťah periód-svietivosť pre vybrané Cepheidy v M31 (Hubble, 1929b)



Obr. 1.5: Vzťah periód-svietivosť pre Cepheidy nenachádzajúce sa len vo Veľkej hmlovine v Andromede (Hubble, 1929b)





1.5 obsahuje 106 premenných Cepheid, ktoré sa nachádzajú v Malom Magellanovom mračne (značené krížikom), 40 Cepheid objavených v galaxii M31 (značené čiernym kruhom), 35 Cepheid v galaxii M33<sup>8</sup> (značené otvoreným kruhom) a 9 Cepheid v N.G.C 6822<sup>9</sup> (značené trojuholníkom).

Objav Cepheid v galaxii M31 znamenal veľký prelom v usporiadaní a chápaní vesmíru. Vďaka Henriette Swan Leavittovej a jej objavu bola otázka vesmírnych vzdialeností bližšie ako kedykoľvek predtým. Na základe vzťahov 1.2 a 1.3 sa podarilo určiť vzdialenosť k M31, ktorá bola pre mnohých astronómov tej doby obrovským prekvapením (Hubble, 1929b)

## 1.8 Pokusy o stanovenie vzdialenosti M31

Prvé pokusy o prelomenie vesmírnych vzdialeností neboli všeobecne prijaté, nakoľko jednotlivé metódy nemali v sebe patričnú dávku kredibility. Po odvodení trigonometrických paralaxí špirálových galaxií sa zainteresovaná skupina astronómov nemohla dohodnúť na jednotnom názore ich korektnosti. Už v roku 1786 britský astronóm William Herschel stanovil vzdialenosť k našej susednej galaxii M31 na 2.000 násobok vzdialenosti Síria, ktorý je vzdialený cca 8,6 svetelného roku (Herschel, 1786), (Perryman, 2010). V roku 1907 Bohlin s použitím 15. fotografických platní odvodil kladnú paralaxu M31, ktorá zodpovedala vzdialenosti približne 19 svetelných rokov (Bohlin, 1907). O štyri roky neskôr Very na základe priemerov galaxií určil vzdialenosť k M31 na cca 1.600 svetelných rokov. Wolf v roku 1912 prezentoval morfologické kritéria vzdialenosti a na základe nich stanovil vzdialenosť ku galaxii M31 na 10 kpc (Smith, 1982). Táto hodnota však bola vysoko ovplyvnená vtedajším vnímaním veľkosti Mliečnej dráhy, ktorú autor nazýva ako "štandardnú ty". Všetko to pramenilo z typického vtedajšieho Kapteyn-Steeligerovom vesmíru s aliquotnou veľkosťou rádovo 1 kpc (Eddington, 1923).

Presvedčivejšie hodnoty vzdialeností k blízkym špirálovým galaxiám začali prichádzať až z vlastností ich hviezd. Prvý kvalitatívny odhad vzdialenosti galaxií urobil v roku 1917 Curtis na základe porovnávania zdanlivých magnítud galaktických a extragalaktických nov (Curtis, 1917). Jeho pozorovania viedli až k hodnote 20.000.000 svetelných rokov. Táto hodnota nebola síce správna, ale naznačila, že M31 nemusí byť v skutočnosti tak blízko, ako to predpokladali Curtisovi predchodcovia. Všetky ďalšie odhady a výpočty vzdialených galaxií boli vykonané prostredníctvom analyzovania nov (Öpik, 1922), (Duerbeck, 2002). Problémom bolo, že novy neboli všeobecne uznané ako indikátory vzdialeností na galaktických škálach. Shapley skúmal v roku 1917 jasné hviezdy situované v M31 pomocou, ktorých určil jej vzdialenosť na 1.000.000 svetelných rokov. Veľký skeptik van Maanen tvrdil, že paralaxa M31 je veľká, konkrétne 0,004 uhlovej sekundy z čoho pramení približná hodnota vzdialenosti len 815 svetelných rokov (van Maanen, 1918). Knut Lundmark, ktorý sa tiež venoval určovaniu paralaxy M31,

---

<sup>8</sup>M33 je špirálová galaxia v súhvezdí Trojuholník a spolu s M31 a našou Mliečnou dráhou tvoria miestnu skupinu galaxií.

<sup>9</sup>N.G.C ako "The New General Catalogue of Nebulae and Clusters of Stars" je komplexný katalóg vesmírnych objektov zostavený Johnom Luisom Emilom Dreyerom v roku 1888.

stanovil jej vzdialenosť na 650.000 svetelných rokov (Lundmark, 1919). Jeden s posledných astronómov, ktorý sa pokúsili ešte pred Hubbleom určiť vzdialenosť k M31 bol Öpik, ktorý ju určil na približne na 1.500.000 svetelných rokov (Öpik, 1922). Až vyššie popísaný objav premenných Cepheid v blízkosti Veľkej galaxie v Andromede vyriešilo Hubbleovi problém so stanovením korektnej vzdialenosti (Duerbeck, 2002).

## 1.9 Špirálová hmlovina ako hviezdny systém a jej vzdialenosť

Ako už bolo vyššie spomenuté, ohľadom galaxie M31, na ktorej sa prevádzal rozsiahly výskum sprostredkovaný na 100 a 60 palcových ďalekohľadoch nachádzajúcich sa v tej dobe na observatórium Mount Wilson. Zistilo sa, že novy sa bežne vyskytujú v M31. Do tej doby bolo v galaxii M31 objavených 36 premenných hviezd a 46 nov, v ktorých sú už započítané aj novy (konkrétne 22 nov) objavené na observatóriu Mount Wilson. Periódy a fotografické magnitúdy boli určené pre 12 Cepheid z M31. Pričom zvyšné premenné hviezdy, ktoré v danom období boli známe sú taktiež pravdepodobne Cepheidy, nakoľko vykazujú podobné vlastnosti prudkého nárastu a pomalého poklesu jasu.

Obr. 1.6: Cepheidy v M31, na základe ktorých bola určená jej vzdialenosť (Hubble, 1929b)

Var. No.	Period in Days	Log. P	Photographic Magnitude Max.
5	50.17	1.70	18.4
7	45.04	1.65	18.15
16	41.14	1.61	18.6
9	38	1.58	18.3
1	31.41	1.50	18.2
12	22.03	1.34	19.0
13	22	1.34	19.0
10	21.5	1.33	18.75
2	20.10	1.30	18.5
17	18.77	1.28	18.55
18	18.54	1.27	18.9
14	18	1.26	19.1

Tabuľka 1.6 popisuje parametre objavených Cepheid v M31, pričom sú zaznamenané len tie premenné hviezdy, ktorých magnitúdy nie sú slabšie ako 19,5, nakoľko neistota určenia sa rapídne zvyšuje a relevantnosť hodnoty tým pádom výrazne klesá. Teraz teda familiárna korelácia medzi periódou a svietivosťou je viditeľne prítomná.

Pri detailnejšom vyšetrení vzťahu perióda-svietivosť sú magnitúdy v maxime vynesené opäť logaritmicky vzhľadom k periódam udaných v dňoch. Tento proces je nevyhnutný a to nie iba kvôli neistotám, ktoré sú markantné pri slabších magnitúdach, ale aj preto, že veľa slabých premenných hviezd vo svojom minime je pod úrovňou sledovateľnosti. Sklon vykreslenej krivky je veľmi podobný ako pre galaxiu M33, ale priemerná odchýlka je o dosť väčšia a pohybuje sa na úrovni 0,2 magnitúdy. Čo je pravdepodobne viac ako by bolo spôsobené, len hrubou

chybou pri výpočtoch. Shapleyova krivka pre vzťah medzi periódou a svietivosťou (Hubble, 1925) pre Cepheidy, ako dáva jeho štúdia guľových hviezdokôp je konštruovaná na základe vizuálnej magnitúdy. Tieto výsledky však môžu byť redukované aj na fotografické magnitúdy, kde budú znamenať jeho reláciu medzi periódou a farebným indexom, keďže výsledky reprezentujú originálne dáta. Sklon rádovo odpovedá, aj keď expandujeme na galaxie, no nie je to úplne presné.

V porovnaní tých dvoch musí väčšia váha padnúť na jasnejšiu časť krivky pre špirálovej galaxie, pretože tam je väčšia spoľahlivosť určenia magnitúdy. Výsledná hodnota je teda  $M-m=-21,8$ . Odpovedajúca vzdialenosť 285 000 parsekov. Najväčšia neistota je pravdepodobne obsiahnutá v nulovom bode Shapleyho krivky. Tieto výsledky boli postavené na troch hlavných pilieroch, ktoré v sebe zahŕňujú :

- Premenné hviezdy sa nachádzajú v skúmaných špirálových galaxiách
- Neexistuje žiadne vážne množstvo absorpcie vzhľadom k amorfnej hmlovitosti v špirálových galaxiách
- Povaha premenlivosti Cepheid je jednotná na celej škále pozorovaného vesmíru

## 1.10 Zhrnutie

Po objave vzťahu medzi periódou a svietivosťou, ktorý vykazujú premenné Cepheidy sa uznala korektná metóda určovania vzdialenosti vo vesmíre, platná na oveľa väčšie vzdialenosti ako dovtedy známa metóda paralaxy. Pred Hubbleom, ktorý ako prvý použil Cepheidy na určenie vzdialenosti k M31, bolo mnoho pokusov a rozličných metód, ktoré neviedli k správne výsledku. Nižšie uvedená tabuľka 1.1 poskytuje stručný historický prehľad, ohľadom pokusov o stanovenie vzdialenosti k M31.

Tabuľka 1.1: Vzdialenosti k M31

Meno	Vzdialenosť [ly]	Metóda	Rok
Herschel (Herschel, 1786)	17.200	magnitúda	1786
Bohlin (Bohlin, 1907)	19	paralaxa	1907
Very (Very, 1911)	1600	priemery	1911
Wolf (Smith, 1982)	32.600	morfologické kritéria	1912
Curtis (Curtis, 1917)	20.000.000	novy	1917
Shapley (Shapley, 1917)	1.000.000	jasné hviezdy	1917
van Maanen (van Maanen, 1918)	815	paralaxa	1918
Lundmark (Lundmark, 1919)	650.000	paralaxa	1919
Öpik (Öpik, 1922)	1.500.000	novy	1922
Hubble (Hubble, 1925)	930.000	Cepheidy	1925
Hubble (Hubble, 1929b)	900.000	Cepheidy	1929
McConnachie (McConnachie, 2005)	2.559.100	TRGB <sup>a</sup>	2005

<sup>a</sup> "Tip of the red-giant branch" je metóda, ktorá využíva červených obrov na určovanie vzdialeností.

## 2. Rozpínanie vesmíru

### 2.1 Dopplerov jav, červený a modrý posun

Dopplerov jav, alebo tiež Dopplerov efekt je pomenovaný po rakúskom fyzikovi Christianovi Johannovi Dopplerovi, ktorý ako prvý daný jav popísal v roku 1842 v Prahe vo svojom článku "Ueber das farbige Licht der Doppelsterne und einiger anderer gestirne des Himmels" (Doppler, 1842), (Hubble, 1995), (Harrison, 2000), (Duerbeck, 2002). Dopplerova myšlienka obstála v teste na zvukové vlny, ktorý sprostredkoval Buys Ballot v roku 1845 (Eden, 1992). O šesť rokov neskôr nezávisle na objavoch Dopplera pozoroval rovnaký efekt Hippolite Fizeau na elektromagnetických vlnách (Becker, 2011). Jedná sa o zmenu frekvencie alebo vlnovej dĺžky, ktorá je spôsobená pohybom pozorovateľa, alebo zdroja.

Pre nás je najpodstatnejší fakt ako Dopplerov jav súvisí s astronómiou. Spektrá hviezd sú nehomogénne a v dobre definovaných frekvenciách vykazujú absorpčné čiary, ktoré sú v korelácii s energiou potrebnou k excitácii elektrónov medzi jednotlivými hladinami. Dopplerov jav je teda možné detegovať na základe toho, že dané absorpčné čiary nie sú vždy na frekvenciách, ktoré sú získané od spektra stojatého svetelného zdroja. Teda modré svetlo má vyššiu frekvenciu než červené svetlo a spektrálne čiary približujúceho sa zdroja vykazujú modrý posun a naopak vzdalujúce sa objekty vykazujú červený posun (Duerbeck, 2002).

### 2.2 Určovanie rýchlosti vzdalovania objektu pomocou merania červeného posunu

V dvadsiatych rokoch minulého storočia prebiehal rozsiahly výskum týkajúci sa špirálových galaxií, ktorý bol sústredený prevažne na observatóriu Mount Wilson. Najviac informácii ohľadom spektier galaxií sa podarilo nazbierať Vestovi Melvinovi Slipherovi, ktorý ukázal, že prevažná väčšina jeho spektier vykazuje červený posun, čo implikuje vzdalovanie sa skúmaných objektov.

Ako už bolo vyššie spomenuté červený posun vykazujú systémy, ktoré sa od pozorovateľa vzdalujú. Je to spôsobené tým, že svetlo putujúce zo vzdalujúceho sa objektu zväčší svoju vlnovú dĺžku, a tým zníži frekvenciu, čo je ekvivalentom posunutia spektra do červenej oblasti, nakoľko červená reprezentuje nízkofrekvenčnú oblasť. Naše snaženie sa však bude sústreďiť, len na kozmologický červený posun<sup>1</sup>, ktorý je zapríčinený expandujúcim vesmírom. Pri jednoduchšej predstave rozpínania vesmíru zvažujeme dva body, ktoré sú od seba dostatočne vzdialené. Pokiaľ sa vesmír rozpína rovnomerne, čím ďalej budú dané telesá od seba ďalej, tým rýchlejšie sa budú od seba pohybovať aj napriek tomu, že v skutočnosti sami nemusia vykazovať žiaden pohyb, ale len kopírujú expanziu priestoru.

---

<sup>1</sup>Je dobré si uvedomiť, že kozmologický červený posun je v skutočnosti rušivý pohyb metriky časopriestoru, ktorá je previazaná s gravitáciou. Jej flexibilita pri expanzii vesmíru podnecuje objekty ku kozmologickému pohybu na rozdiel od Dopplerovho červeného posunu, ktorý je spôsobený skutočným pohybom skúmaného predmetu vzhľadom k pozorovateľovi.

Preto ako už bolo v úvode napísané, je nutné brať do úvahy len tie objekty, ktorých vzdialenosti sú na úrovni stoviek kiloparsekov. Ak by sme postupovali do oblasti, ktorá by bola dostatočne blízko od referenčného pozorovateľa, do hry by sa výrazným spôsobom dostala gravitačná interakcia, ktorá po prekročení určitej línie preváži nad expandujúcim vesmírom a pozorované objekty udrží na konštantnej vzdialenosti, alebo dokonca podnieti ich približovanie aj napriek rozpínajúcemu sa priestoru.

V mnohých literatúrach môžeme nájsť zámennosť medzi zjavnou radiálnou rýchlosťou a červených posuvom, to však pramení z formy Hubbleovho vzťahu, nakoľko zjavná radiálna rýchlosť je len prenasobený červený posun o rýchlosť svetla. Vo všetkých ďalších kapitolách preto nebudeme explicitne rozlišovať radiálne rýchlosti od červeného posunu.

## 2.3 Radiálne rýchlosti vesmírnych objektov ako vodítko na určenie ich vzdialenosti

V roku 1917 mal Willem de Sitter k dispozícii len tri hodnoty dát ohľadom radiálnych rýchlostí blízkyh galaxií. Avšak v tom čase ich už bolo známych celkovo 25 (Slipher, 1917). O šesť rokov neskôr vydal Sir Arthur Stanley Eddington učebnicu s názvom "The Mathematical Theory of Relativity", v ktorej publikoval zoznam 41 meraní radiálnych rýchlostí galaxií, ktoré prevzal od Vesta Melvina Sliphera pôsobiaceho v tej dobe na Lowellskom observatóriu (Eddington, 1923). Ten sa neúnavným spôsobom snažil zozbierať, čo najviac radiálnych rýchlostí, ktoré sa však nikdy dôkladne nepokúsil overiť. V jeho práci z roku 1915 rozdelil objavené hmloviny do dvoch skupín podľa toho ako sú situované vzhľadom k Mliečnej ceste. Celkovo tu popísal 15 objektov, z ktorých sa len štyri vyznačovali modrým posunom (Slipher, 1915).

Prvý, kto sa pokúsil overiť dovtedajšie Slipherove pozorovania, bol Willem de Sitter, ten ale nemal dostatok validných dát na to, aby previedol dôkladný test a potvrdil tak predpoklad o tzv. "de Sitterovom efekte", ktorý pojednáva o vzťahu medzi červeným posunom a vzdialenosťou. Neskôršie výskumi a objavy nových galaxií ukázali, že červené posuvy sú oveľa dominantnejšie, ako by sa v tej dobe na prvý pohľad mohlo zdať (Slipher, 1917), (Slipher, 1915). Neskôr Harlow Shapley a Marta Shapley v roku 1919 objavili istú reláciu medzi rýchlosťou a galaktickou šírkou. Avšak Henry Russell apeloval na Shapleyho výsledky s dotazom ohľadom zakrivenia časopriestoru a jeho možného dopadu na určovanie radiálnych rýchlostí (Duerbeck, 2002).

Jedna z najvýznamnejších udalostí v roku 1923, ktorá sa konala bolo hľadanie nov. Problém však bol, že nie celá astronomická komunita toho času považovala novy za indikátory vzdialenosti. Všetko sa ale zmenilo keď E.P. Hubble objavil premenné Cepheidy vo Veľkej galaxii v Andromede. Cepheidy ako indikátory vzdialenosti boli nepochybne potvrdené v roku 1912 Henrietou Swan Leavittovou (viď kapitola 1.6.). Dva katalógy s vizuálnymi magnitúdami hmlovín boli pou-

žité v dvadsiatych rokoch na konštrukciu vzťahu medzi radiálnymi rýchlosťami a vzdialenosťami. Jedným z nich je na základe vizuálnych odhadov Holetscheka, ktoré boli publikované v roku 1907 a následne roztriedené do uceleného rozsahu Hopmannom (Hopmann, 1921). Druhy katalóg zostavil Wirtz v roku 1923 (Wirtz, 1923). Celá druhá a tretia dekáda dvadsiateho storočia sa vo svete pozorovateľskej astronómie niesla v duchu bádania za rámec predstaviteľných vzdialeností. Až správnou detekciou radiálnych rýchlostí sa vtedajší svet mohol priblížiť k hlbším útrobám vesmíru.

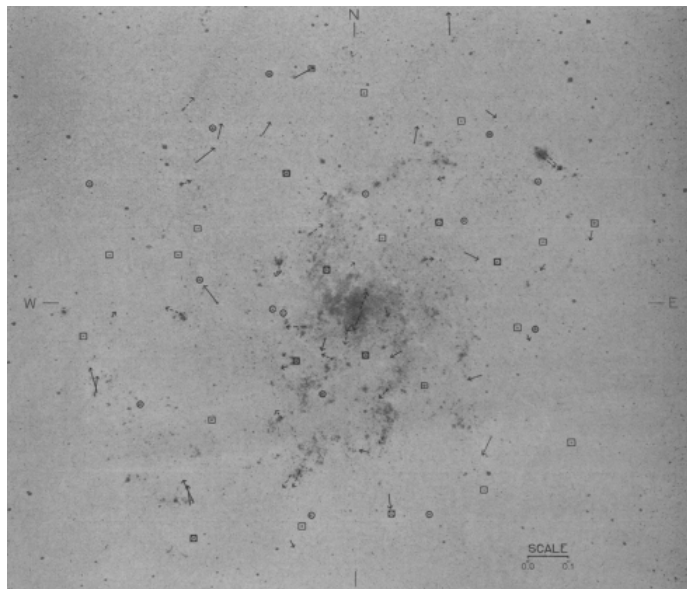
## 2.4 Shapley-Curtisova debata

Na začiatku 20. storočia sa prehlbovali diskusie ohľadom určitého typu objektov, ktoré sa vyskytovali v Messierovom katalógu pod názvom špirálové hmloviny. Debaty boli zapríčinené predovšetkým z toho dôvodu, že ich povaha nebola do značnej miery objasnená. Celá astronomická spoločnosť tej doby bola rozdelená na dva veľké tábory, ktoré sa nevedeli zhodnúť na tom, či spomenuté špirálové hmloviny sú alebo nie sú súčasťou našej Mliečnej cesty, s čím súvisela aj otázka týkajúca sa veľkosti našej Mliečnej cesty a tým aj celého vesmíru. Pretrvávajúce spory vyústili až do debaty medzi dvoma významnými astronómami, konkrétne medzi Harlowom Shapleyom a Heberom Curtisom. Táto takzvaná Veľká diskusia sa uskutočnila 26. apríla 1920 v prírodovedeckom múzeu vo Washingtone. V publikácii, ktorá vyšla 3. mája 1921 bola rozsiahla diskusia o mnohých astronomických problémoch. Pre nás bude najpodstatnejšia rozprava ohľadom veľkosti vesmíru (Hubble, 1995), (Smith, 1982).

Shapley sa domnieval, že celý vesmír je tvorený, len našou galaxiou. Bol presvedčený, že špirálové hmloviny ako napríklad v tých dobách známa Veľká galaxia v Andromede, sú len súčasťou Mliečnej cesty. Argumentoval to tým, že ak by galaxia v Andromede nebola súčasťou Mliečnej cesty, potom by jej vzdialenosť bola cca  $10^8$  svetelných rokov, čo bolo príliš veľké číslo nato aby bolo prijaté širokou škálou vtedajších astronómov. Taktiež sa opieral o výskum Adriaana van Maanena, ktorý sa zaoberal pohybom špirálových hmlovín. Vo svojom článku z 19. marca 1916, v ktorom popisuje tzv. "metódu blinkania" pomocou, ktorej skúmal hviezdne pohyby špirálových galaxií (konkrétne sa tu venoval galaxii M101). Jeho merania však priniesli rýchlosti hviezd tak veľké, že ak by bolo pravdou, že skúmané galaxie tvoria samostatné hviezdne systémy, potom jednotlivé ich zložky by obiehali kolo centra rýchlosťami vyššími, ako je rýchlosť svetla vo vákuu. Následne na to vydal mnohé ďalšie články rozoberajúce rotáciu iných galaxií ako napríklad M33 a M81, pri ktorých však dospel k rovnakému výsledku. Vďaka van Maanenovej popularite všetko nasvedčovalo tomu, že Shapley má pravdu ohľadom rozloženie vesmíru (van Maanen, 1916), (Hubble, 1995), (Smith, 1982).

Na druhej strane však oponoval Curtis, ktorý tvrdil že Mliečna cesta je len samostatná jednotka vo vesmíre a všetky dovtedy známe galaxie, či hmloviny nie sú jej súčasťou, ale tvoria vlastný systém s obrovským počtom hviezd. Svoje argumenty stavil na detekcii nov v už spomínanej Veľkej galaxii v Andromede. Ukázal, že ich obsahuje oveľa viac ako naša Mliečna cesta, a tým podporil svoje tvrdenie, že sa jedná o odlišný hviezdny systém. Táto debata bola vyriešená až Edwinom

Powellom Hubbleom, ktorý objavil premenné hviezdy typu delta Cephei vo Veľkej hmlovine v Andromede. Svojim spôsobom mali obaja aktéri v niečom pravdu, nakoľko v ich dobe mnohé informácie, ktoré boli diskutované neboli dostatočne preskúmané na to, aby oprávňovali viesť túto Veľkú diskusiu (Hubble, 1995), (Smith, 1982).



Obr. 2.1: Pohyb vybraných hviezd z galaxie M33 (van Maanen, 1921)

Vyššie uvedený obrázok 2.1 zachytáva hviezdy pohyb a rotáciu galaxie M33, ktorý bol zverejnený vo van Maanenovom článku vydanom v roku 1921.

## 2.5 Ludwik Silberstein a jeho závislosť medzi červeným posunom a vzdialenosťou (1924)

V januári roku 1924 sa objavuje prvá zmienka ohľadom relácie medzi radiálnou rýchlosťou a vzdialenosťou, ktorá však nebola veľmi presvedčivá. Hlavným dôvodom, pre ktorý sa tento článok považuje za nekorektný je ten, že si Silberstein vybral za referenčné objekty guľové hviezdokopy a Magellanove mračná (Duerbeck, 2002).

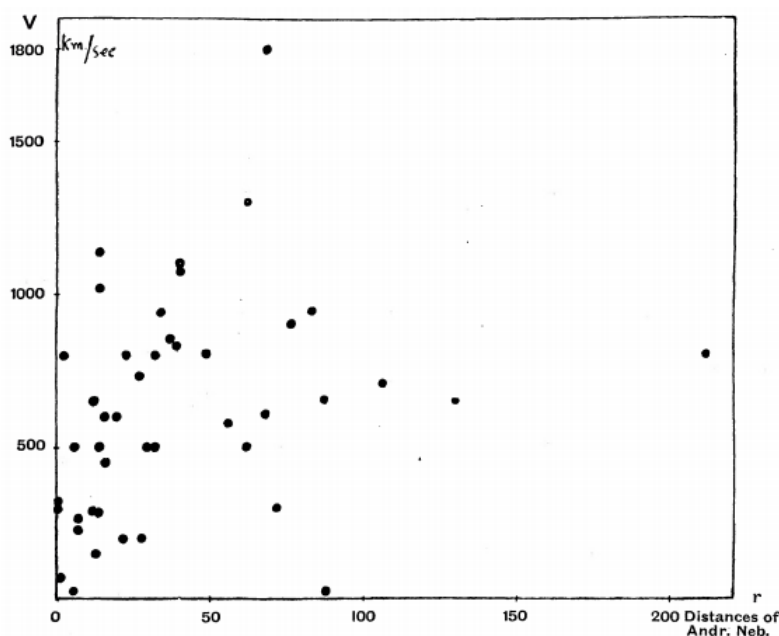
Pre takúto reláciu, však výber vyššie spomenutých objektov nebol vhodný. Použité boli dva diametrálne odlišné typy objektov, ktoré znemožnili správne prevedenie skúmaného vzťahu. Je dobré si však uvedomiť podstatu myšlienky, ktorá bola u Silbersteina ukrytá, a ktorá umožnila jeho nasledovníkom precíznejšie zvolenie referenčných objektov, a tým aj vykreslenie korektnej korelácie medzi radiálnou rýchlosťou a vzdialenosťou (Duerbeck, 2002).

## 2.6 Knut Emil Lundmark a jeho závislosť radiálnej rýchlosti na vzdialenosti (1924)

Prvú závislosť medzi radiálnou rýchlosťou a vzdialenosťou vyniesol na základe Slipherových štúdií v roku 1924 švédsky astronóm Knut Emil Lundmark. Jeho grafy však postrádajú fit, ktorý by dokumentoval skutočnú závislosť týchto dvoch parametrov. Autor poznamenáva, že jeho grafy nepotrebujú žiadnu prekládajúcu krivku, nakoľko bol presvedčený, že je to zbytočné (Lundmark, 1924).

Výrazným spôsobom sa zaoberal Silbersteinovým výskumom a skutočne ukázal, že galaxie vykazujú určité systematické črty. Jeho závislosť na rozdiel od Silbersteina zahrňovala len galaxie alebo len hviezdokopy. To sa neskôr ukázalo ako, tá správna voľba referenčných skupín objektov pre danú závislosť (Lundmark, 1924).

Vo svojom článku z roku 1924 o zakrivení časopriestoru v de Sitterovom vesmíre sa zaoberá slnečným pohybom vzhľadom k blízkym a vzdialeným objektom. Mnohí astronómovia tej doby mali problém právne pochopiť a demonštrovať problém spojený s pohybom Slnka. Na základe Slipherových výsledkov bolo možné spočítať polomer krivosti pozorovaných objektov. Zo znalosti polomeru krivosti bolo možné stanoviť pomocou Shapleových paralaxí vzdialenosť skúmaných galaxií, či hviezdokop. Lundmark pracoval z referenčnou vzdialenosťou medzi Mliečnou cestou a Veľkou galaxiou v Andromede. Uvažoval konštantné priemery a svietivosti všetkých pozorovaných galaxií. Týmto spôsobom bolo vynesene niekoľko grafov, ktoré demonštrovali závislosť radiálnej rýchlosti na vzdialenosti (Lundmark, 1924).



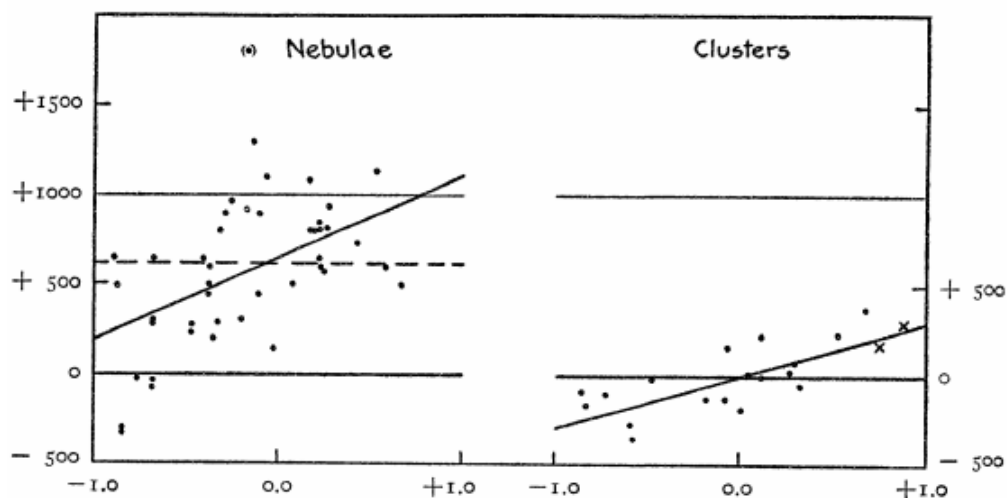
Obr. 2.2: Vzťah medzi relatívnou vzdialenosťou (v jednotkách vzdialenosti od M31) a meranou radiálnou rýchlosťou špirálových hmlovín (Lundmark, 1924)



## 2.7 Gustaf Strömberg a vzťah radiálnej rýchlosti na vzdialenosti (1925)

Ako mnohí z jeho súčasníci aj on sa venoval okrem iného problémom ohľadom pohybu slnka vo vesmíre. Taktiež zozbieral a pridal informácie ohľadom radiálnych rýchlostí hmlovín a hviezdokop, ktoré do značnej miery prevzal od V.M. Sliphera. Jeho štúdium týchto aspektov vyvrcholilo v článku z roku 1925, v ktorom porovnával závislosť medzi radiálnou rýchlosťou a vzdialenosťou vzhľadom k Slnku a závislosť radiálnej rýchlosti na  $\cos\lambda$  (čiže voči polohe na oblohe), kde  $\lambda$  predstavuje uhlovú vzdialenosť od protihľadáneho slnečného vrcholu (Strömberg, 1925).

Jeho štúdium týchto korelácií zakončil prehlásením, že neexistuje žiaden relevantný dôkaz, ktorý by podložil správnosť vzťahu medzi radiálnou rýchlosťou a vzdialenosťou od Slnka. Jediná spoľahlivá relácia, ktorá pramenila z jeho dlhoročných pozorovaní bola medzi už spomínanou radiálnou rýchlosťou a polohou skúmaných objektov na oblohe. Po dosadení zozbieraných dát do rovnice popisujúcej elementy slnečného pohybu dostal približnú hodnotu čiarkovanej vodorovnej čiary v nižšie uvedenom grafe 2.7 ako  $K=616$  km. Táto Strömbergova relácia a jeho práce podnietili Lemaîtrea k tomu, aby začal písať novú históriu vesmíru (Strömberg, 1925).



Obr. 2.3: Závislosť medzi radiálnou rýchlosťou a  $\cos\lambda$ , ako pre hmloviny, tak aj pre hviezdokopy (Strömberg, 1925)

## 2.8 Georges Edouard Lemaître ako otec "Hubbleovej konštanty" (1927)

V úvode je nutné poznamenať, že familiárny názov "Hubbleova konštanta" je len zaužívané pomenovanie, ale pravdou je, že sa nejedná o žiadnu konštantu. V skutočnosti ide o strednú hodnotu pomeru prvej časovej derivácie expanzného

parametru ku samotnému nederivovanému časovo závislému expanznému parametru. Vzhľadom k tejto skutočnosti je nutné "Hubbleovu konštantu" chápať ako parameter charakterizujúci kontrakciu vesmíru, ktorý sa v čase vyvíja.

Lemaître vo svojom článku nezávisle na Alexandrovi Friedmannovi odvodil Hubbleov zákon zo všeobecných poľných relativistických Einsteinových rovníc. Friedmann bol týmito rovnicami tak fascinovaný, že v roku 1922 zverejnil článok, v ktorom ukázal nestacionaritu vesmíru. Tento záver, o ktorom sa Einstein dozvedel bol v značnej miere rozporuplný, nakoľko sám autor poľných relativistických rovníc predpokladal statickosť vesmíru Friedmann (1922).

Lemaître, ktorý podobnou sadou výpočtov, aké už sprostredkoval Friedmann preukázal, že vesmír skutočne nemôže byť statický a jeho dynamickosť je ukrytá v Einsteinových rovniciach. Dokázal, že polomer krivosti, buď neustále narastá, alebo sa mení v čase, ale v žiadnom prípade nie je konštantný. Určil prvú hodnotu "Hubbleovej konštanty" na  $H = 625 \text{ km}/(\text{sMpc})$ . Tento fakt je možné považovať za jeden z najväčších astronomických objavov vôbec, pretože spojil vtedy nespojitelnú všeobecnú teóriu relativity, s pozorovateľskými faktami. Dokázal, že Einstein správne odvodil svoje poľné rovnice, z ktorých vyplýva dynamickosť sveta, no jeho predikcia nebola správna a musela byť opravená práve Lemaîtreom, ktorý sa ako jeden z mála popredných osobností tej doby nenechal ovplyvniť širokou škálou astronómov, ktorý zastávali predstavu statického vesmíru. Nakoľko však Lemaîtreove články boli písané vo francúzštine, nemali dostatok potenciálu preniknúť ďalej, a preto jeho teória ostala dlhé roky nepovšimnutá. Aj napriek tomuto deficitu by si mal Georges Edouard Lemaître zaslúžiť nemalú pozornosť a uznanie za jeho obrovský prínos, ktorý bol o dva roky neskôr pripísaný Edwinovi Powellovi Hubbleovi (Friedmann, 1922), (Friedmann, 1924), (Lemaître, 1927), (Livio, 2013).

## 2.9 Edwin Powell Hubble a expandujúci vesmír (1929)

Definitívnu bodku ohľadom rozpínania vesmíru poskytol Edwin Powell Hubble vo svojom článku zo 17. januára 1929. Poznomenáva, že vzdialenosť hmlovín nachádzajúcich sa mimo Mliečnej cesty závisí hlavne na absolútnej svietivosti daných typov hviezd, na základe ktorých je možné určiť príslušné vzdialenosti. Medzi vyššie spomenuté indikátory vzdialenosti patria už rozoberané premenné Cepheidy.

Skutočné výsledky reprezentujúce vzdialenosti závisia na nulovom bode relácie medzi periódou a svietivosťou pozorovaných Cepheid. Táto metóda je však obmedzená, len na niektoré hmloviny, v ktorých sa daný typ hviezd nachádza a navyše horná hranica absolútnej magnitúdy musí byť najmenej -6,3 hviezdnej veľkosti. Teda zdanlivé magnitúdy hviezd v pozorovaných hmlovinách sú tými faktormi, ktoré musia byť aplikované s veľkou opatrnosťou, aby zaistili rozumné odhady vzdialeností všetkých extragalaktických systémov. Autor zdôrazňuje, že vo vzdialených systémoch je možné detegovať len malé množstvo takých hviezd.

Obr. 2.4: Vybraté hmloviny, ktorých vzdialenosti sú určená buď na základe pozorovaných premenných hviezd, alebo pomocou strednej svietivosti vo hviezdokopách (Hubble, 1929a).

объект	$m_s$	$r$	$v$	$m_t$	$M_t$
S. Mag.	..	0.032	+ 170	1.5	-16.0
L. Mag.	..	0.034	+ 290	0.5	17.2
N. G. C. 6822	..	0.214	- 130	9.0	12.7
598	..	0.263	- 70	7.0	15.1
221	..	0.275	- 185	8.8	13.4
224	..	0.275	- 220	5.0	17.2
5457	17.0	0.45	+ 200	9.9	13.3
4736	17.3	0.5	+ 290	8.4	15.1
5194	17.3	0.5	+ 270	7.4	16.1
4449	17.8	0.63	+ 200	9.5	14.5
4214	18.3	0.8	+ 300	11.3	13.2
3031	18.5	0.9	- 30	8.3	16.4
3627	18.5	0.9	+ 650	9.1	15.7
4826	18.5	0.9	+ 150	9.0	15.7
5236	18.5	0.9	+ 500	10.4	14.4
1068	18.7	1.0	+ 920	9.1	15.9
5055	19.0	1.1	+ 450	9.6	15.6
7331	19.0	1.1	+ 500	10.4	14.8
4258	19.5	1.4	+ 500	8.7	17.0
4151	20.0	1.7	+ 960	12.0	14.2
4382	..	2.0	+ 500	10.0	16.5
4472	..	2.0	+ 850	8.8	17.7
4486	..	2.0	+ 800	9.7	16.8
4649	..	2.0	+1090	9.5	17.0

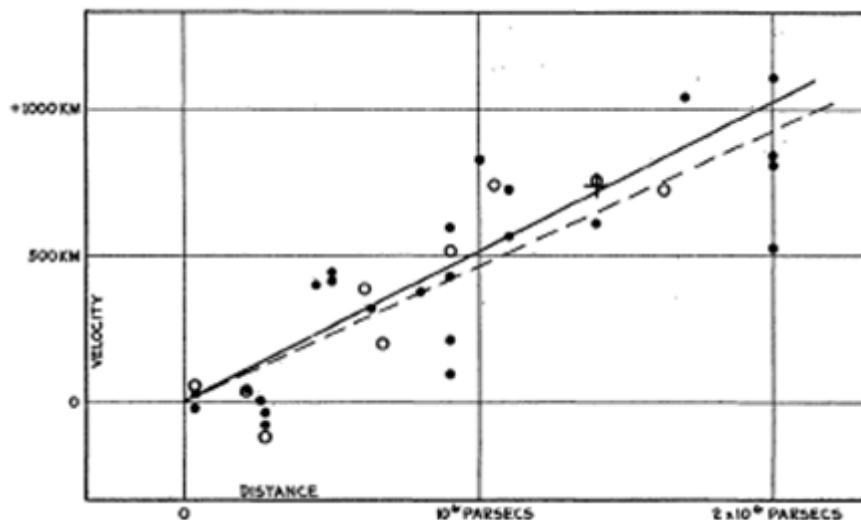
Vyššie uvedená tabuľka 2.4 obsahuje niekoľko podstatných parametrov skúmaných hmlovín, ako  $m_s$  fotografickú magnitúdu jasnejších hviezd,  $r$  vzdialenosť v jednotkách  $10^4$  parsekoch, v rýchlosť udanú v kilometroch za sekundu,  $m_t$  takzvané Holetschekove vizuálne magnitúdy a  $M_t$  totálne absolútne magnitúdy vypočítané z  $m_t$  a  $r$ . Hubble vo svojom spise apeluje, že dáta o radiálnych rýchlostiach sú dostupné celkovo pre 46 extragalaktických hmlovín, ale v článku je uvedených, len 24 takýchto objektov.

Prvých 7 vzdialeností je určených najspoľahlivejšie, nakoľko sa v tej dobe prevádzala rozsiahla štúdia mnohých hviezd z M31 a M32<sup>2</sup>, na základe ktorých bolo možné určiť príslušné vzdialenosti. Ďalších 13 vzdialeností je ovplyvnených hornou hranicou hviezdnych svietivostí, no aj napriek tomu sú tieto údaje veľmi presné. Posledné štyri objekty sú pravdepodobne hviezdokopy v súhvezdí Panna. Všetky vyššie uvedené dáta v tabuľke 2.4 určujú lineárny vzťah medzi vzdialenosťou a rýchlosťou. Predpokladá sa, že rýchlosti sa menia priamo úmerne zo vzdialenosťami. Hubble mal teda dostatok potrebných materiálov od svojich predchodcov na to, aby sprostredkoval linearitu medzi radiálnou rýchlosťou a vzdialenosťou. Dáta z tabuľky 2.4 boli Hubbleom graficky vykreslené do nižšie uvedeného grafu 2.5.

V tomto grafe je možné sledovať pomerne lineárnu závislosť daných charakteristík, ktorá však v tej dobe zachytávala, len veľmi malú pozorovateľnú oblasť, čomu nasvedčuje aj fakt, že vzdialenosti v grafe 2.5 sú obmedzené na cca 2 megaparseky. Zvislá os v grafe 2.5 je udaná v nesprávnych jednotkách. Prínosom Hubbleovej práce bolo predovšetkým to, že radiálne rýchlosti skúmaných objek-

<sup>2</sup> M32 je menšia sprievodná galaxia M31, ktorá sa takisto nachádza v súhvezdí Andromeda

Obr. 2.5: Vzťah medzi radiálnou rýchlosťou a vzdialenosťou pre extragalaktické hmloviny (Hubble, 1929a).



tov odvodil z ich červených posuvov nehladiac na to, že už 12 rokov pred ním ich dáta publikoval Vesto Melvin Slipher. Vzhľadom k presnejším meraniam stanovil Hubble hodnotu jeho konštanty ako  $H = 500 \text{ km}/(\text{sMpc})$ .

Aj napriek tomu, že Lemaître už dva roky pred Hubbleom položil základne predstavy o expandujúcom vesmíre, bol to práve Hubble, ktorý objavil, že závislosť radiálnej rýchlosti na vzdialenosti je lineárna<sup>3</sup>. Navyše skreslené hodnoty priemernej absolútnej magnitúdy pozorovaných galaxií spôsobili, že "Hubbleova konštanta" odvodená v týchto rokoch bola nadštandarde vysoká (Lemaître, 1927), (Hubble, 1929a), (Livio, 2013).

## 2.10 Zhrnutie

Rozpínanie vesmíru predstavuje jeden z najväčších astronomických objavov všetkých dôb. Na základe Slipherových pozorovaní sa ukázalo, že prevažujú červené posuny nad tými modrými. Korelácia medzi červeným posunom a vzdialenosťou bola síce patrná už pred Hubbleom, ale práve on preukázal, že ide o lineárnu závislosť. Je však podstatne, že jeho grafy zachytávajú, len veľmi malé vzdialenostné spektrum. Dva roky pre týmto Hubbleovým objavom Lemaître odvodil podobnú predstavu expandujúceho vesmíru z Einsteinových poľných rovníc gravitácie. Jedna z prvých myšlienok, ktorá zachytávala vzťah medzi radiálnymi rýchlosťami a vzdialenosťami bola práve u Silbersteina. Lundmark ako prvý danú závislosť graficky zobrazil a Strömberg zase tvrdil, že podobná relácie je nepatrná a nemusí byť uvažovaná.

<sup>3</sup>Linearita relácie medzi radiálnou rýchlosťou a vzdialenosťou nebola pred Hubbleom nikdy spomenutá. Až jeho práca z roku 1929 načrtla fakt, že vesmír sa rozpína lineárne.

# Záver

Veľkým prínosom pre celú astronómickú spoločnosť v dvadsiatych rokoch minulého storočia bol objav Henrietti Swan Leavittovej, ktorá našla veľmi dôležitý vzťah medzi svietivosťou a periódou u veľkej skupiny premenných hviezd nesúci spoločný názov Cepheidy. Na základe tohto jej objavu začala pozorovateľná astronómia prudko napredovať, nakoľko sa po dlhých desaťročiach uznal spoľahlivý nástroj k určovaniu vzdialenosti vesmírnych objektov. Výsledok tejto relácie na seba nenechal dlho čakať.

Po objavení nových a nových Cepheid vo vtedy ešte neobjasnených špirálových galaxiách umožňoval spoľahlivo vyčísliť ich vzdialenosť. Najvýznamnejší dôsledok však prišiel o niekoľko rokov neskôr, presnejšie v roku 1925, keď sa Edwinovi Powellovi Hubbleovi podarilo správne určiť vzdialenosť k našej susednej galaxii M31, a tým vyriešiť jednu z najväčších astronomických diskusií všetkých dôb medzi dvoma poprednými aktérmi, konkrétne Harlowom Shapleyom a Herberom Curtisom, ktorý zastávali diametrálne odlišné názory ohľadom usporiadania a veľkosti vesmíru.

Avšak objav, ktorý zmenil pohľad na vesmír sa uskutočnil o niečo neskôr v roku 1929, kedy Hubble definitívne dokázal, že vesmír nie je statický ako pred ním predpokladal Einstein, ale že má expandujúci charakter. Tento zlomový moment bol však zakrytý rúškom tajomstiev, nakoľko odborná literatúra dáva do popredia práve Edwina Powella Hubbla, ktorý je považovaný za objaviteľa expandujúceho vesmíru. Z historických análov je ale zrejmé, že už niekoľko rokov pred ním myšlienka rozpínajúceho sa vesmíru bola živá. Skutočne prvým mužom, ktorý správne vyvodil z Einsteinových poľných rovníc expandujúci vesmír bol Alexander Friedmann. Nezávisle na jeho práci v roku 1927 dospel k rovnakému výsledku Georges Edouard Lemaître, a tým spojil výdobytky teoretickej a pozorovateľskej astronómie. Jeho meno by si prinajmenšom zaslúžilo podobný obdiv ako dnes nesie meno Edwina Powella Hubblea.

Máloktorá odborná literatúra ho však zdôrazňuje v takej miere, aby čitateľa presvedčila o jeho kvalitách, a preto už navždy ostane v Hubbleovom tieni. Z vyššie napísané plyní, že ešte pred Lemaîtreom existovali myšlienky, resp. pokusy o nájdenie určitej korelácie medzi radiálnou rýchlosťou a vzdialenosťou, ktoré ale nemali patričnú dávku tých správnych argumentov, ktoré by ich vyniesli na prvé stránky prestížnych astronomických, či vedeckých časopisov.

# Zoznam použitej literatúry

- BECKER, B. J. (2011). *Unravelling Starlight: William and Margaret Huggins and the Rise of the New Astronomy*. Cambridge University Press. ISBN 110700229X.
- BENEDICT, G. F., MCARTHUR, B. E., FREDRICK, L. W., HARRISON, T. E., SLESNICK, C. L., RHEE, J., PATTERSON, R. J., SKRUTSKIE, M. F., FRANZ, O. G., WASSERMAN, L. H., JEFFERYS, W. H., NELAN, E., VAN ALTENA, W., SHELUS, P. J., HEMENWAY, P. D., DUNCOMBE, R. L., STORY, D., WHIPPLE, A. L. a BRADLEY, A. J. (2002). Astrometry with the Hubble Space Telescope: A Parallax of the Fundamental Distance Calibrator Cephei. *The Astronomical Journal*, **124**(3), 1695. URL <http://stacks.iop.org/1538-3881/124/i=3/a=1695>.
- BENEDICT, G. F., MCARTHUR, B. E., FEAST, M. W., BARNES, T. G., HARRISON, T. E., PATTERSON, R. J., MENZIES, J. W., BEAN, J. L. a FREEDMAN, W. L. (2007). Hubble Space Telescope Fine Guidance Sensor Parallaxes of Galactic Cepheid Variable Stars: Period-Luminosity Relations. *The Astronomical Journal*, **133**(4), 1810. URL <http://stacks.iop.org/1538-3881/133/i=4/a=1810>.
- BOHLIN, K. (1907). Versuch einer Bestimmung der Parallaxe des Andromedanebels. *Astronomische Nachrichten*, **176**, 205–206. doi: 10.1002/asna.19071761303. URL <http://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1002/asna.19071761303/full>.
- BOND, H. E. a SPARKS, W. B. (2009). On geometric distance determination to the Cepheid RS Puppis from its light echoes. *EDP Sciences*, **495**(2), 371–377. doi: 10.1051/0004-6361:200810280. URL <http://www.aanda.org/articles/aa/abs/2009/08/aa10280-08/aa10280-08.html>.
- CURTIS, H. D. (1917). Novae in the Spiral Nebulae and the Island Universe Theory. *Publications of the Astronomical Society of the Pacific*, **29**(171), 206–207. doi: 10.1086/122632. URL <http://adsabs.harvard.edu/abs/1917PASP...29..206C>.
- DE ZEEUW, P. T., HOOGERWERF, R., DE BRUIJNE, J. H. J., BROWN, A. G. A. a BLAAUW, A. (1999). A Hipparcos Census of the Nearby OB Associations. *The Astronomical Journal*, **117**(1), 354. URL <http://stacks.iop.org/1538-3881/117/i=1/a=354>.
- DOPPLER, C. (1842). Ueber das farbige licht der Doppelsterne und einiger anderer Gestirne des Himmels. **25**, 42. URL <https://archive.org/details/ueberdasfarbigel00doppuoft>.
- DUERBECK, H. (2002). Extragalactic research in Europe and the United States in the early 20th century. *Astronomische Nachrichten*, **323**(6), 534–537. ISSN 1521-3994. doi: 10.1002/1521-3994(200212)323:6<534::AID-ASNA534>3.0.CO;2-V. URL [http://dx.doi.org/10.1002/1521-3994\(200212\)323:6<534::AID-ASNA534>3.0.CO;2-V](http://dx.doi.org/10.1002/1521-3994(200212)323:6<534::AID-ASNA534>3.0.CO;2-V).

- EDDINGTON, ARTHUR STANLEY, S. (1923). *The mathematical theory of relativity*. Cambridge University Press. URL <https://archive.org/details/mathematicaltheo00eddiuoft>.
- EDEN, P. A. (1992). *The Search for Christian Doppler*. Springer Vienna. ISBN 978-3-7091-7378-7. doi: 10.1007/978-3-7091-6677-2.
- FREEDMAN, W. L., MADORE, BARRY F. AND GIBSON, B. K. F. L., KELSON, DANIEL D. AND SAKAI, S., MOULD, JEREMY R. AND KENNICUTT, J. R. C. F. H. C. G. J. A. H. J. P. H. S. M. G., ILLINGWORTH, G. D. a MACRI, LUCAS M. AND STETSON, P. B. (2001). Final Results from the Hubble Space Telescope Key Project to Measure the Hubble Constant. *Astronomical*, **553** (1). doi: 10.1086/320638. URL <http://iopscience.iop.org/article/10.1086/320638/meta#citations>.
- FRIEDMANN, A. (1922). Über die Krümmung des Raumes. *Zeitschrift für Physik*, **10**(1), 377–386. doi: 10.1007/BF01332580. URL <http://dx.doi.org/10.1007/BF01332580>.
- FRIEDMANN, A. (1924). Über die Möglichkeit einer welt mit konstanter negativer Krümmung des Raumes. *Zeitschrift für Physik*, **21**(1), 326–332. ISSN 0044-3328. doi: 10.1007/BF01328280. URL <http://dx.doi.org/10.1007/BF01328280>.
- GOLDBERG, L. (1973). Obituary: Harlow Shapley. *Physics Today*, **26**(1), 107–108. URL <http://dx.doi.org/10.1063/1.3127920>,.
- HARRISON, E. (2000). *Cosmology: The Science of the Universe*. Cambridge University Press. ISBN 9780521661485.
- HERSCHEL, W. (1786). Catalogue of One Thousand New Nebulae and Clusters of Stars. By William Herschel, LL.D. F. R. S. *Philosophical Transactions of the Royal Society of London*, **76**, 457–499. URL <http://adsabs.harvard.edu/abs/1786RSPT...76..457H>.
- HERTZSPRUNG, E. (1926). On the relation between period and form of the light-curve of variable stars of the Delta Cephei type. *Bulletin of the Astronomical Institutes of the Netherlands*, **3**(96), 115–120. doi: 10.1086/122632. URL <http://adsabs.harvard.edu/abs/1926BAN....3..115H>.
- HERTZSPRUNG, E. (1913). Über die räumliche Verteilung der Veränderlichen vom delta Cephei-Typus. *Astronomische Nachrichten*, **196**, 201. URL <http://adsabs.harvard.edu/abs/1913AN....196..201H>.
- HOFFLEIT, D. (1996). HISTORY OF THE DISCOVERY OF MIRA STARS. *New Haven*. URL <http://web.archive.org/web/20070405082807/http://www.aavso.org/vstar/vsots/mirahistory.shtml>.
- HOPMANN, J. (1921). Photometrische Untersuchungen von Nebelflecken. *Astronomische Nachrichten*, **214**(23), 425. doi: 10.1002/asna.19212142302. URL <http://adsabs.harvard.edu/abs/1921AN....214..425H>.

- HUBBLE, E. (1925). Cepheids in Spiral Nebulae. *Pop. Astr.*, **33**, 252–255. URL <http://adsabs.harvard.edu/abs/1925PA....33..252H>.
- HUBBLE, E. (1926). Extra-galactic nebulae. **324**, 1–49. URL <http://adsabs.harvard.edu/abs/1926CMWCI.324....1H>.
- HUBBLE, E. (1929a). A relation between distance and radial velocity among extra-galactic nebulae. *PNAS*, **15**(3), 168–173. doi: 10.1073/pnas.15.3.168. URL <http://www.pnas.org/content/15/3/168.full>.
- HUBBLE, E. (1929b). A spiral nebula as a stellar system. Messier 31. *Astrophysical*, **69**(376), 103–158. URL <http://adsabs.harvard.edu/abs/1929CMWCI.376....1H>.
- HUBBLE, E. (1995). The 1920 Shapley-Curtis Discussion: Background, Issues, and Aftermath. *The university of Chicago press*, **107**(718), 1133–1144. URL <http://www.jstor.org/stable/40680661>.
- JETSU, L. a PORCEDDU, S. (2015). Shifting Milestones of Natural Sciences: The Ancient Egyptian Discovery of Algal’s Period Confirmed. *PLOS ONE*, **10**(12), 1–23. doi: 10.1371/journal.pone.0144140. URL <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0144140>.
- KERVELLA, P. AND MÉRAND, A. S. L. F. P. B. D. P. E. P. G. (2008). The long-period Galactic Cepheid RS Puppis. *EDP Sciences*, **480**(1), 167–178. doi: 10.1051/0004-6361:20078961. URL <http://www.aanda.org/articles/aa/abs/2008/10/aa8961-07/aa8961-07.html>.
- LEAVITT, HENRIETTA S.; PICKERING, E. C. (1912a). Periods of 25 Variable Stars in the Small Magellanic Cloud. **173**, 1–3. URL <http://adsabs.harvard.edu/abs/1912HarCi.173....1L>.
- LEAVITT, HENRIETTA S.; PICKERING, E. C. (1912b). Periods of 25 Variable Stars in the Small Magellanic Cloud. *Harvard College Observatory Circular*, **173**, 1–3. URL <http://adsabs.harvard.edu/abs/1912HarCi.173....1L>.
- LEAVITT, HENRIETTA S.; PICKERING, E. C. (1912c). Periods of 25 Variable Stars in the Small Magellanic Cloud. *Harvard College Observatory Circular*, **173**, 1–3. URL <http://adsabs.harvard.edu/abs/1912HarCi.173....1L>.
- LEMAÎTRE, G. (1927). Un Univers homogène de masse constante et de rayon croissant rendant compte de la vitesse radiale des nébuleuses extra-galactiques. *Annales de la Société Scientifique de Bruxelles*, **47**, 49–59. URL <http://adsabs.harvard.edu/abs/1927ASSB...47...49L>.
- LIVIO, M. (2013). Measuring the Hubble constant. *Physics Today*, **66**(10), 41. doi: 10.1063/PT.3.2148. URL <http://physicstoday.scitation.org/doi/10.1063/PT.3.2148>.
- LUNDMARK, K. (1919). Die Stellung der kugelförmigen Sternhaufen und Spiralnebel zu unserem Sternsystem. *Astronomische Nachrichten*, **209**, 369. doi: 10.1002/asna.19192092402. URL <http://adsabs.harvard.edu/abs/1919AN...209..369L>.



- LUNDMARK, K. (1924). The determination of the curvature of space-time in de Sitter's world. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, **84**, 747–770. doi: 10.1093/mnras/84.9.747. URL <http://adsabs.harvard.edu/abs/1924MNRAS...84..747L>.
- MAEDER, A. (2009). *Physics, formation and evolution of rotating stars*. Springer. ISBN 3-540-76948-X.
- MAJAESS, D., TURNER, D., BIDIN, C. M., MAURO, F., GEISLER, D., GIEREN, W., MINNITI, D., CHENÉ, A.-N., LUCAS, P., BORISSOVA, J., KURTEV, R., DÉKÁNY, I. a SAITO, R. K. (2011). New Evidence Supporting Membership for TW Nor in Lyngå 6 and the Centaurus Spiral Arm. *The Astrophysical Journal Letters*, **741**(2), L27. URL <http://stacks.iop.org/2041-8205/741/i=2/a=L27>.
- MCCONNACHIE, A. W.; IRWIN, M. J. F. A. M. N. I. R. A. L. G. F. T. N. (2005). Distances and metallicities for 17 Local Group galaxies. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, **356**, 979–997. doi: 10.1111/j.1365-2966.2004.08514.x. URL <http://adsabs.harvard.edu/abs/2005MNRAS.356..979M>.
- MESSIER, C. (1781). Catalogue des Nébuleuses des amas d'Étoiles. *Connaissance des Temps*, pages 227–267. URL <http://messier.seds.org/xtra/history/m-cat81.html>.
- PERRYMAN, M. (2010). *The Making of History's Greatest Star Map*. Springer. ISBN 978-3-642-11602-5. URL <https://link.springer.com/book/10.1007/2F978-3-642-11602-5>.
- PIGOTT, E. (1785). Observations of a new variable star. in a Letter from Edward Pigott, Esq. to Sir H. C. englefield, bart. f. r. s. and a. s. **75**, 127–136. URL <http://www.jstor.org/stable/106750>.
- ÖPIK, E. (1922). An estimate of the distance of the Andromeda Nebula. *Astrophysical*, **55**, 406–410. doi: 10.1086/142680. URL <http://adsabs.harvard.edu/abs/1922ApJ...55..406O>.
- RITCHEY, G. W. (1917). Novae in Spiral Nebulae. *Publications of the Astronomical Society of the Pacific*, **29**(171), 210a. URL <http://stacks.iop.org/1538-3873/29/i=171/a=210A>.
- RODGERS, A. W. (1957). Radius Variation and Population Type of Cepheid Variables. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, **117**(1), 85. URL <http://dx.doi.org/10.1093/mnras/117.1.85>.
- SHAPLEY, H. (1917). A Faint Nova in the Nebula of Andromeda. *Publications of the Astronomical Society of the Pacific*, **29**(171), 213–217. doi: 10.1086/122669. URL <http://adsabs.harvard.edu/abs/1917PASP...29Q.213S>.
- SHAPLEY, HARLOW; YAMAMOTO, I. W. H. H. (1925). Internal Motion in the Spiral Nebula Messier 33. Preliminary Results. *Harvard College Observatory Circular*, **280**, 1–8. URL <http://adsabs.harvard.edu/abs/1925HarCi.280...1S>.

- SLIPHER, V. M. (1915). Spectrographic Observations of Nebulae. *Popular Astronomy*, **23**, 21–24. URL <http://adsabs.harvard.edu/abs/1915PA....23...21S>.
- SLIPHER, V. M. (1917). Nebulae. **56**(6), 403–409. URL <http://adsabs.harvard.edu/abs/1917PAPhS..56..403S>.
- SMITH, R. W. (1982). *The Expanding Universe: Astronomy's 'Great Debate', 1900-1931*. Cambridge University Press. ISBN 978-0-521-23212-8. URL [https://books.google.cz/books?id=jVjFmzLJdQAC&printsec=frontcover&hl=sk&source=gbs\\_atb#v=onepage&q&f=false](https://books.google.cz/books?id=jVjFmzLJdQAC&printsec=frontcover&hl=sk&source=gbs_atb#v=onepage&q&f=false).
- SOSZYŃSKI, I.; UDALSKI, A. S. M. K. K. M. P. G. W. . S. O. U. K. P. R. (2008). The Optical Gravitational Lensing Experiment. The OGLE-III Catalog of Variable Stars. II.Type II Cepheids and Anomalous Cepheids in the Large Magellanic Cloud. *Acta Astronomica*, **58**, 293. URL <http://adsabs.harvard.edu/abs/2008AcA....58..293S>.
- STRÖMBERG, G. (1925). Analysis of radial velocities of globular clusters and non-galactic nebulae. *Astrophysical*, **61**, 353–362. doi: 10.1086/142897. URL <http://adsabs.harvard.edu/doi/10.1086/142897>.
- TAMMANN, G. A., SANDAGE, A. a REINDL, B. (2008). The expansion field: the value of H 0. *The Astronomy and Astrophysics Review*, **15**(4), 289–331. ISSN 1432-0754. doi: 10.1007/s00159-008-0012-y. URL <http://dx.doi.org/10.1007/s00159-008-0012-y>.
- TURNER, D. G. (1996). The Progenitors of Classical Cepheid Variables. *Journal of the Royal Astronomical Society of Canada*, **90**. URL <http://adsabs.harvard.edu/abs/1996JRASC..90...82T>.
- TURNER, D. G. (2010). The PL calibration for Milky Way Cepheids and it's implications for the distance scale. *Astrophysics and Space Science*, **326**(2), 219–231. ISSN 1572-946X. doi: 10.1007/s10509-009-0258-5. URL <http://dx.doi.org/10.1007/s10509-009-0258-5>.
- VAN MAANEN, A. (1918). Parallax of the Andromeda Nebula. *Publications of the Astronomical Society of the Pacific*, **30**(177), 307. doi: 10.1086/122759. URL <http://adsabs.harvard.edu/abs/1918PASP...30..307V>.
- VAN MAANEN, A. (1921). Internal Motion in the Spiral Nebula Messier 33. Preliminary Results. *PNAS*, **7**(1), 1–5. doi: 10.1073/pnas.7.1.1. URL <http://adsabs.harvard.edu/abs/1921PNAS....7....1V>.
- VAN MAANEN, A.; RITCHEY, G. W. K. J. E. P. C. D. C. H. D. (1916). Preliminary evidence of internal motion in the spiral nebula Messier 101. **118** (118), 1–19. URL <http://adsabs.harvard.edu/abs/1916CMWCI.118....1V>.
- VERY, F. W. (1911). Are the White Nebulae Galaxies. *Astronomische Nachrichten*, **189**, 441. doi: 10.1002/asna.19111892402. URL <http://adsabs.harvard.edu/abs/1911AN....189..441V>.

- WALLERSTEIN, G. (2002). The Cepheids of Population II and Related Stars. *Publications of the Astronomical Society of the Pacific*, **114**(797), 689. URL <http://stacks.iop.org/1538-3873/114/i=797/a=689>.
- WIRTZ, C. (1923). Flächenhelligkeiten von 566 Nebelflecken und Sternhaufen Nach Photometrischen Beobachtungen am cm-Refraktor der Univeritats-Sternwarte Strassburg (Elsass) 1911-1916. **29**, 5–63. URL <http://adsabs.harvard.edu/abs/1923MeLuS..29....5W>.

# Zoznam obrázkov

1.1	Charakteristiky všetkých 25. premenných hviezd (Leavitt, 1912b)	9
1.2	Závislosť medzi svietivosťou a periódou pre 25. skúmaných premenných hviezd, kde graf 1a) je v nelogaritmickej mierke (vľavo) a graf 1b) je v logaritmickej mierke (vpravo) (Leavitt, 1912b)	9
1.3	Svetelné krivky pre štyri Cepheidy v M31 (Hubble, 1929b)	11
1.4	Vzťah perióda-svietivosť pre vybrané Cepheidy v M31 (Hubble, 1929b)	12
1.5	Vzťah perióda-svietivosť pre Cepheidy nenachádzajúce sa len vo Veľkej hmlovine v Andromede (Hubble, 1929b)	12
1.6	Cepheidy v M31, na základe ktorých bola určená jej vzdialenosť (Hubble, 1929b)	14
2.1	Pohyb vybraných hviezd z galaxie M33 (van Maanen, 1921)	19
2.2	Vzťah medzi relatívnou vzdialenosťou (v jednotkách vzdialenosti od M31) a meranou radiálnou rýchlosťou špirálových hmlovín (Lundmark, 1924)	20
2.3	Závislosť medzi radiálnou rýchlosťou a $\cos\lambda$ , ako pre hmloviny, tak aj pre hviezdokopy (Strömberg, 1925)	21
2.4	Vybraté hmloviny, ktorých vzdialenosti sú určené buď na základe pozorovaných premenných hviezd, alebo pomocou strednej svietivosti vo hviezdokopách (Hubble, 1929a).	23
2.5	Vzťah medzi radiálnou rýchlosťou a vzdialenosťou pre extragalaktické hmloviny (Hubble, 1929a).	24

# Zoznam tabuliek

1.1	Vzdialenosti k M31 . . . . .	15
-----	------------------------------	----